

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-014005  
(43)Date of publication of application : 18.01.2002

(51)Int.Cl. G01M 11/02  
G01B 11/00  
G03F 7/22  
H01L 21/027

(21)Application number : 2000-216868 (71) (72)NIKON CORP  
Applicant :  
(22)Date of filing : 18.07.2000 Inventor : HAGIWARA TSUNEYUKI

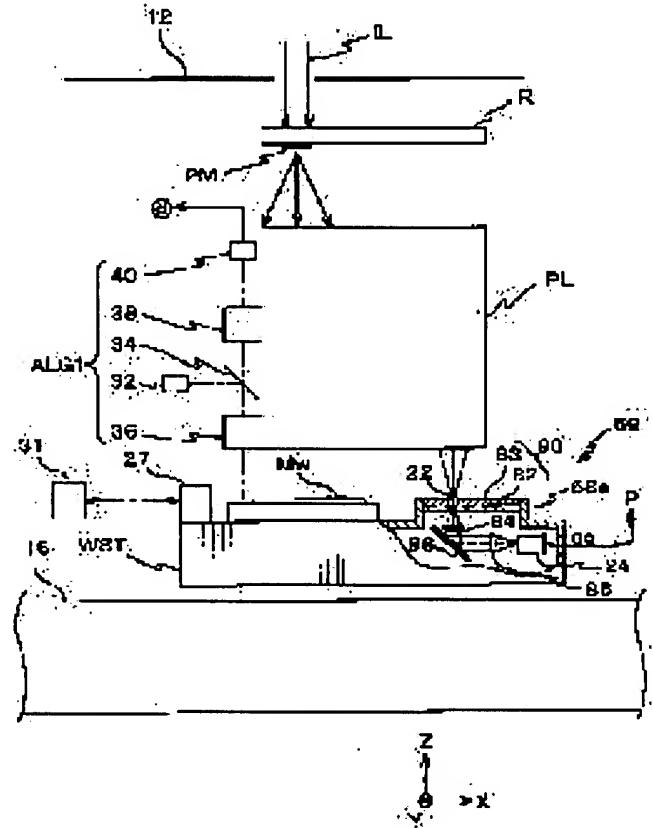
(30)Priority  
Priority number : 2000123553 Priority date : 25.04.2000 Priority country : JP

(54) MEASURING METHOD OF SPATIAL IMAGE, MEASURING METHOD OF IMAGING CHARACTERISTIC, MEASURING DEVICE FOR SPATIAL IMAGE, AND EXPOSURING DEVICE

### (57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To measure a spatial image with full accuracy.

**SOLUTION:** A slit 22, which extends in Y-axis direction, having a width in the measurement direction (X-axis direction) less than (wavelength  $\lambda$  / opening number N.A. of a projection optical system), is formed in a slit plate 90 of a spatial image measurement apparatus 59. When a specific pattern PM illuminated with an illumination light IL for this purpose and when the slit plate 90 is scanned in X-axis direction to the spatial image, in a state in which the spatial image of that pattern is formed on the image surface by way of a projection optical system PL, the light having transmitted the slit 22 during scanning is photoelectrically converted with a photoelectric converter element 24. The photoelectric



conversion signal (signal which corresponds to the light intensity of the spatial image) is output. Then based on the photoelectric conversion signal, light intensity distribution corresponding to the spatial image is measured with a controller. In this case, the spatial image can be measured with practically sufficient accuracy, since the width of the slit 22 is equal to or less than ( $\lambda / \text{N.A.}$ ).

---

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-14005

(P2002-14005A)

(43)公開日 平成14年1月18日 (2002.1.18)

(51)Int.Cl.  
G 0 1 M 11/02

識別記号

F I  
G 0 1 M 11/02

テマコト(参考)  
A 2 F 0 6 5

G 0 1 B 11/00

G 0 1 B 11/00

B 2 G 0 8 6  
C 5 F 0 4 6  
B  
Z

審査請求 未請求 請求項の数22 O L (全 36 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2000-216868(P2000-216868)  
(22)出願日 平成12年7月18日 (2000.7.18)  
(31)優先権主張番号 特願2000-123553(P2000-123553)  
(32)優先日 平成12年4月25日 (2000.4.25)  
(33)優先権主張国 日本 (JP)

(71)出願人 000004112  
株式会社ニコン  
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号  
(72)発明者 萩原 恒幸  
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内  
(74)代理人 100102901  
弁理士 立石 篤司

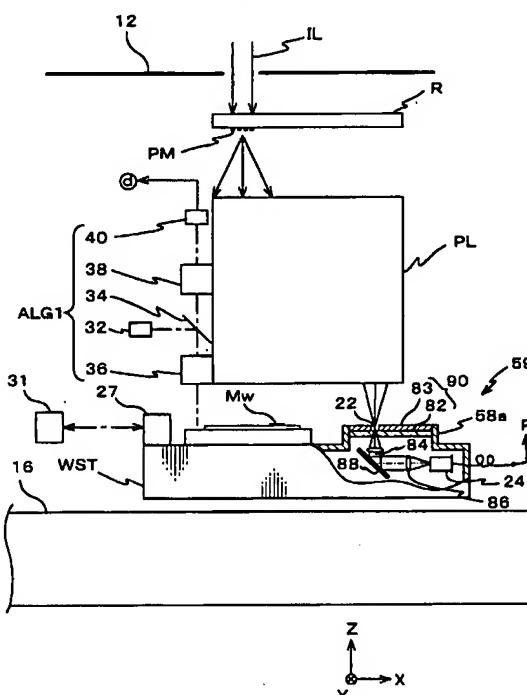
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 空間像計測方法、結像特性計測方法、空間像計測装置及び露光装置

(57)【要約】

【課題】 十分な精度で空間像を計測することを可能にする。

【解決手段】 空間像計測器59のスリット板90には、計測方向(X軸方向)の幅が(波長λ/投影光学系の開口数N. A.)以下でY軸方向に伸びるスリット22が形成されている。このため、照明光ILによって所定のパターンPMが照明され、該パターンの空間像が投影光学系PLを介して像面上に形成された状態で、上記空間像に対してスリット板90がX軸方向に走査されると、その走査中にスリット22を透過した光が光電変換素子24で光電変換され、その光電変換信号(空間像の光強度に対応する信号)が outputされる。そして、この光電変換信号に基づいて制御装置により空間像に対応する光強度分布が計測される。この場合、スリット22の幅が(λ/N. A.)以下とされているため、実用上十分な、高い精度で空間像を計測することができる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記照明光の波長 $\lambda$ を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む空間像計測方法。

【請求項2】 投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記投影光学系の開口数N. A. を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む空間像計測方法。

【請求項3】 前記スリットの前記第2方向の幅は、零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A. で除した $(\lambda/N. A.)$ 以下であることを特徴とする請求項1又は2に記載の空間像計測方法。

【請求項4】 前記スリットの前記第2方向の幅は、前記 $(\lambda/N. A.)$ の0.8倍以下であることを特徴とする請求項3に記載の空間像計測方法。

【請求項5】 前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光及び前記パターンの種別を含む照明条件によって定まる解像限界のラインアンドスペースパターンのピッチである最小ピッチの半分の奇数倍であることを特徴とする請求項1又は2に記載の空間像計測方法。

【請求項6】 前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光の波長を $\lambda$ 、前記投影光学系の開口数をN. A. として、 $(\lambda/(2N. A.))$ の奇数倍として規定されることを特徴とする請求項1又は2に記載の空間像計測方法。

【請求項7】 前記光電変換信号をフーリエ変換して空間周波数分布を求め、該求めた空間周波数分布を前記スリットの既知の周波数スペクトルで割り返して元の空間像のスペクトル分布に変換し、該スペクトル分布を逆フーリエ変換することにより元の空間像を回復する工程を更に含むことを特徴とする請求項1～6のいずれか一項

に記載の空間像計測方法。

【請求項8】 投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、

照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる所定幅のスリットを少なくとも1つ有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第1方向に垂直な第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；前記光電変換信号に所定の処理を施して前記投影光学系の結像特性を求める工程と；を含む結像特性計測方法。

【請求項9】 前記パターンは、第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであり、

前記光電変換信号の検出を、前記スリット板の前記光軸方向の位置を変化させつつ複数回繰り返し、

20 前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号をそれぞれフーリエ変換し、それぞれの1次周波数成分と零次周波数成分の振幅比であるコントラストを求め、該コントラストが最大となる光電変換信号に対応する前記光軸方向の位置を検出することにより前記投影光学系のベストフォーカス位置を検出することを特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項10】 前記ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行うことにより、前記投影光学系の像面形状を検出する工程を更に含むことを特徴とする請求項9に記載の結像特性計測方法。

【請求項11】 前記投影光学系の光軸における前記ベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数の前記ラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、前記各パターンに対応する前記ベストフォーカス位置の差に基づいて前記投影光学系の球面収差を求める工程を更に含むことを特徴とする請求項9に記載の結像特性計測方法。

【請求項12】 前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンであり、  
前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、  
前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれの位相を検出し、該位相検出の結果に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることが特徴とする請求項8に記載の結像特性計

測方法。

【請求項13】 前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンであり、

前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項14】 前記パターンは、全体として矩形状で、前記第1方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項15】 前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、

前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求める特徴とする請求項14に記載の結像特性計測方法。

【請求項16】 前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであり、

前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各ラインパターンの線幅異常値を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項17】 前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであり、

前記所定の処理として、前記光電変換信号の前記各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、前記ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項18】 前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる少なくとも2種類のラインパターンを有する対称マークパターンであり、

前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記パターンの空間像の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求める特徴とする請求項8に記載の結像特性計測方法。

【請求項19】 投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測装置であって、前記パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成するため、前記パターンを照明する照明装置と；

前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な第2方向の幅が零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A. で除した( $\lambda/N. A.$ )以下である、少なくとも1つのスリットを有するスリット板と；前記スリット板を透過した前記照明光を光電変換して、前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子と；前記照明装置により前記パターンが照明され、前記像面上に前記空間像が形成された状態で、前記像面近傍の前記2次元平面内で前記スリット板を前記第2方向に走査するとともに、前記光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を計測する処理装置と；を備える空間像計測装置。

【請求項20】 マスクに形成された回路パターンを投影光学系を介して基板に転写する露光装置であって、前記基板を保持する基板ステージと；前記スリット板が前記基板ステージと一体で移動可能に構成された請求項19に記載の空間像計測装置とを備える露光装置。

【請求項21】 前記空間像計測装置を用いて、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された前記光強度分布のデータに基づいて前記投影光学系の結像特性を求める制御装置を更に備える特徴とする請求項20に記載の露光装置。

【請求項22】 前記基板ステージ上のマークの位置を検出するマーク検出系と；前記空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置と前記マーク検出系との相対位置関係を検出する制御装置を更に備える特徴とする請求項20に記載の露光装置。

40 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、空間像計測方法、結像特性計測方法、空間像計測装置及び露光装置に係り、更に詳しくは、投影光学系より像面に形成される空間像を計測する空間像計測方法、該空間像計測方法を利用して投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法、前記空間像計測方法を実行するための空間像計測装置、及び該空間像計測装置を備える露光装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来より、半導体素子又は液晶表示素子

等をフォトリソグラフィ工程で製造する際に、フォトマスク又はレチクル（以下、「レチクル」と総称する）のパターンを、投影光学系を介して表面にフォトレジスト等の感光剤が塗布されたウエハ又はガラスプレート等の基板上に転写する投影露光装置、例えばステップ・アンド・リピート方式の縮小投影露光装置（いわゆるステッパー）や、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置（いわゆるスキャニング・ステッパー）等が用いられている。

【0003】ところで、半導体素子等を製造する場合には、異なる回路パターンを基板上に幾層にも積み重ねて形成する必要があるため、回路パターンが描画されたレチクルと、基板上の各ショット領域に既に形成されたパターンとを正確に重ね合わせることが重要である。かかる重ね合せを精度良く行うためには、投影光学系の結像特性が所望の状態に調整されることが必要不可欠である。

【0004】この投影光学系の結像特性の調整の前提として、結像特性を正確に計測する必要がある。この結像特性の計測方法として、所定の計測用パターンが形成された計測用マスクを用いて露光を行い、計測用パターンの投影像が転写形成された基板を現像して得られるレジスト像を計測した計測結果に基づいて結像特性を算出する方法（以下、「焼き付け法」と呼ぶ）が、主として用いられている。この他、実際に露光を行うことなく、計測用マスクを照明光により照明し投影光学系によって形成された計測用パターンの空間像（投影像）を計測し、この計測結果に基づいて結像特性を算出する方法（以下、「空間像計測法」と呼ぶ）も行われている。

【0005】従来の空間像計測は、概ね次のようにして行われていた。すなわち、例えば図38（A）に示されるように、正方形開口122が形成された開口板123を基板ステージ上に設置し、不図示の投影光学系によって形成された計測用レチクル上の計測用パターンの空間像MP'に対して、基板ステージを介して開口板123を矢印Aの方向に走査し、開口122を透過した照明光を光電変換素子によって受光して光電変換する。この光電変換により、図38（B）に示されるような光電変換信号（空間像に対応する光強度信号）が得られる。次に、この図38（B）に示されるような光電変換信号の波形を走査方向に対して微分することで図38（C）に示されるような微分波形を求める。そして、この図38（C）に示されるような微分波形に基づいてフーリエ変換法などの公知の所定の信号処理を施し、計測マークが投影された光学像（空間像）を求める。

【0006】かかる空間像の計測及びこれに基づく投影光学系のディストーション等の検出については、例えば、特開平10-209031号公報等などに詳細に開示されている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来の空間像計測方法にあっては、大きな開口を走査させて空間像強度を計測していたことから、図38（B）に示されるように、空間像のプロファイルを特徴付ける空間周波数成分以外に大きな低周波成分が混在する結果となってしまっていた。この一方、後段の信号処理系のダイナミックレンジには限りがあり、また、信号処理系のダイナミックレンジに対する分解能（例えば、現状では16ビット程度）が限られていることから、結果的に、空間像のプロファイルを反映した信号成分のS/N比が小さくならざるを得なかった。このため、ノイズに弱く、空間像から空間像強度信号に変換する際に像プロファイルの劣化が大きくなってしまい、十分な精度で空間像を計測することが困難であった。

【0008】この他、従来においても、主としてパターンの結像位置の検出を目的として、スリットをパターンの空間像に対して走査する装置が、例えば特開昭58-7823号などに開示されている。しかし、該公報に開示される装置では、スリット幅は、マスクパターン（基準パターン）の形状に対応して決定されていた。このため、種々の形状（大きさを含む）のパターンの空間像を正確に計測することは困難であった。

【0009】本発明は、かかる事情の下になされたもので、その第1の目的は、十分な精度で空間像を計測することができる空間像計測方法及び空間像計測装置を提供することにある。

【0010】また、本発明の第2の目的は、投影光学系の結像特性を精度良く計測することができる結像特性計測方法を提供することにある。

【0011】また、本発明の第3の目的は、露光精度の向上を図ることができる露光装置を提供することにある。

【0012】

【課題を解決するための手段】一般に、露光装置に備えられる投影光学系の解像度（解像力）Rは、Rayleighの式で良く知られているように、 $R = k \times \lambda / N.A.$  の関係（ $\lambda$ は照明光の波長、N. A. は投影光学系の開口数、kはレジストの解像力の他にプロセスによって決定される定数（プロセス係数）である）で表される。そこで、発明者は、かかる点に着目して、種々の実験等を行った結果、空間像計測に用いられる開口の走査方向の幅を、照明光の波長 $\lambda$ 、投影光学系の開口数N. A. との少なくとも一方を考慮して定めることにより、空間像計測において良好な結果が得られることが判明した。本発明に係る空間像計測方法は、かかる発明者の得た新規知見に基づいてなされたものである。

【0013】請求項1に記載の発明は、投影光学系（PL）によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光（IL）によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影

光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記照明光の波長 $\lambda$ を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板(90)を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む。

【0014】これによれば、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。そして、この空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が照明光の波長 $\lambda$ を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を像面近傍の前記2次元平面内で第2方向に走査するとともに、スリットを透過した照明光を光電変換してスリットを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に所定の処理を施すことにより、空間像(像強度の分布)を得ることができる。

【0015】すなわち、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像を得ることができる。この場合、スリットの走査方向の幅が照明光の波長を考慮して定められているので、十分な精度で空間像を計測することができる。

【0016】請求項2に記載の発明は、投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測方法であって、照明光によって前記パターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が前記投影光学系の開口数N. A. を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；を含む。

【0017】これによれば、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。そして、この空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な前記2次元平面内の第2方向の幅が投影光学系の開口数N. A. を考慮して定められた少なくとも1つのスリットを有するスリット板を像面近傍の前記2次元平面内で第2方向に走査するとともに、スリットを透過した照明光を光電変換してスリットを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に所定の処理を施すことにより、

空間像(像強度の分布)を得ることができる。

【0018】すなわち、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像を得ることができる。この場合、スリットの走査方向の幅が投影光学系の開口数を考慮して定められているので、十分な精度で空間像を計測することが可能となる。

【0019】上記請求項1及び2に記載の各発明に係る空間像計測方法において、請求項3に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A. で除した( $\lambda/N. A.$ )以下であることが望ましい。かかる場合には、解像力に影響を与える2つのパラメータである波長 $\lambda$ 及び開口数N. A. の両者を考慮してスリットの走査方向の幅が定められているので、請求項1及び2に記載の各発明に比べても一層精度良く空間像を計測することが可能になる。ここで、スリットの走査方向の幅が、( $\lambda/N. A.$ )以下であるとしたのは、第1に、発明者が、スリットの走査方向の幅(2Dとする)を、 $2D = f(\lambda/N. A.) = n \cdot (\lambda/N. A.)$ として、シミュレーション及び実験等を繰り返し行なった結果、係数 $n = 1$ とした場合に良好な結果(十分に実用的な結果)が得られたからであり、第2に、後述するように、上記の光電変換信号は、スリットと空間像の強度分布とのコンボリューションになるため、計測精度の面からは、スリットの走査方向の幅2Dは小さい程良いからである。

【0020】この場合において、請求項4に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、前記( $\lambda/N. A.$ )の0.8倍以下であることが一層望ましい。上述の如く、計測精度の面からは、スリット幅は小さい程良く、発明者が行ったシミュレーションと実験によれば、スリット幅2Dが $\lambda/(N. A.)$ の80%以下であれば、より一層実用的であることが確認された。

【0021】しかしながら、スループット面からの制約を考慮すると、2Dがあまりに小さいと、スリットを透過する光強度が小さくなりすぎて、計測が困難となるので、ある程度の大きさは必要である。

【0022】上記請求項1及び2に記載の各発明に係る空間像計測方法において、請求項5に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光及び前記パターンの種別を含む照明条件によって定まる解像限界のラインアンドスペースパターンのピッチである最小ピッチの半分の奇数倍であることとしても良い。

【0023】ここで、コンベンショナル照明の下で、位相シフト法等を用いない通常パターンの場合、上記の最小ピッチは、ほぼ $\lambda/N. A.$ となり、位相シフトパターン、すなわち、位相シフト法を採用した位相シフトマスク(位相シフトレチクル)のパターンの場合には、最小ピッチは、ほぼ $\lambda/(2N. A.)$ となることが、確認されている。なお、位相シフトマスクとしては、ハー

フトーン型、レベンソン型などが挙げられる。

【0024】上記請求項1及び2に記載の各発明に係る空間像計測方法において、請求項6に記載の発明の如く、前記スリットの前記第2方向の幅は、前記照明光の波長を $\lambda$ 、前記投影光学系の開口数をN. A. として、 $\{\lambda / (2N. A.)\}$ の奇数倍として規定されることとしても良い。

【0025】上記請求項1～6に記載の各発明において、請求項7に記載の発明の如く、前記光電変換信号をフーリエ変換して空間周波数分布を求め、該求めた空間周波数分布を前記スリットの既知の周波数スペクトルで割り返して元の空間像のスペクトル分布に変換し、該スペクトル分布を逆フーリエ変換することにより元の空間像を回復する工程を更に含むこととすることができる。

【0026】請求項8に記載の発明は、投影光学系の結像特性を計測する結像特性計測方法であって、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成する工程と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる所定幅のスリットを少なくとも1つ有するスリット板を前記像面近傍の前記2次元平面内で前記第1方向に垂直な前記第2方向に走査するとともに、前記スリットを透過した前記照明光を光電変換して前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を得る工程と；前記光電変換信号に所定の処理を施して前記投影光学系の結像特性を求める工程と；を含む。

【0027】これによれば、照明光によって所定のパターンを照明し、該パターンの空間像を投影光学系を介して像面上に形成する。この状態で、投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる所定幅のスリットを少なくとも1つ有するスリット板を像面近傍の前記2次元平面内で第1方向に垂直な第2方向に走査するとともに、スリットを透過した照明光を光電変換してスリットを透過した照明光の強度に応じた光電変換信号を得る。そして、この光電変換信号に所定の処理を施して投影光学系の結像特性を求める。

【0028】すなわち、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像を得ることができ、この得られた光電変換信号に所定の処理を施して投影光学系の結像特性を求めるので、投影光学系の結像特性を精度良く計測することが可能となる。

【0029】この場合において、請求項9に記載の発明の如く、前記パターンは、第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである場合に、前記光電変換信号の検出を、前記スリット板の前記光軸方向の位置を変化させつつ複数回繰り返し、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号をそれぞれフーリエ変換し、それぞれの1次周波数成分と零次周波数成分の振幅比であるコントラストを求め、該コントラストが最大となる光電変換信号に

対応する前記光軸方向の位置を検出することにより前記投影光学系のベストフォーカス位置を検出することとすることができる。上記コントラストは、フォーカス位置（デフォーカス量）に応じて敏感に変化するので、本発明によれば、投影光学系のベストフォーカス位置を精度良く、かつ容易に計測（決定）することができる。

【0030】この場合において、請求項10に記載の発明の如く、前記ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行うことにより、前記投影光学系の像面形状を検出する工程を更に含むこととすることができる。像面、すなわち、最良結像面は、光軸からの距離が異なる無数の点（すなわち、いわゆる像の高さが異なる無数の点）におけるベストフォーカス点の集合から成る面であるから、ベストフォーカス位置の検出を、前記投影光学系の光軸からの距離が異なる複数点に関して繰り返し行い、その検出結果に基づいて統計的処理を行うことにより容易にかつ正確に像面を求めることが可能になる。

【0031】上記請求項9に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項11に記載の発明の如く、前記投影光学系の光軸における前記ベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数の前記ラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、前記各パターンに対応する前記ベストフォーカス位置の差に基づいて前記投影光学系の球面収差を求める工程を更に含むこととすることができる。球面収差は、光学系の開口収差の1つであり、光軸上の物点からの種々の開口を持った光線束が光学系に入射したとき、その対応した像点が一点に結像しない現象である。従って、投影光学系の光軸におけるベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数のラインアンドスペースパターンについて繰り返し行い、各パターンに対応するベストフォーカス位置の差に基づいて演算により球面収差を簡単に求めることができる。

【0032】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項12に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンであり、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれの位相を検出し、該位相検出の結果に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることが可能となる。

【0033】ここで、ディストーションとは、イメージフィールド内の周辺で本来直線になるべきものが曲った像になる投影光学系の収差であり、ディストーションにより倍率誤差がある場合と同様に、パターン像が像面上

の所定の位置からずれて（横ずれして）結像される。

【0034】本発明によれば、位相検出の手法により、投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影されるパターンの空間像の位置ずれをそれぞれ精度良く求めることができるので、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。ここで、パターンは、第2方向の幅がスリットの第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むこととしたのは、パターンの第2方向の幅がスリットより小さいと、コマ収差等の他の収差の影響により、ディストーションを正確に測定することが困難になるからである。

【0035】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項13に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向の幅が前記スリットの前記第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むパターンである場合に、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることがある。

【0036】本発明によれば、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影されるパターンの空間像の位置をそれぞれ精度良く求めることができ、結果的にディストーションを精度良く計測することができる。ここで、パターンは、第2方向の幅がスリットの第2方向の幅より大きい矩形パターンを少なくとも1つ含むこととしたのは、請求項12の場合と同様の理由による。

【0037】上記請求項8に記載の結像特性計測方法において、請求項14に記載の発明の如く、前記パターンは、全体として矩形状で、前記第1方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンであることとしても良い。かかる場合には、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像の検出が行われる際に、スリットがパターンの周期方向に垂直な方向に相対走査され、結果的に、そのパターンの全体形状と同形状の矩形パターンをスリットスキャンしたときと、同様の空間像の信号を得ることができる。これにより、例えば、最近のC M Pプロセスにおいて、ディッシングが生じるため形成が困難とされていた $10 \mu m$ 角のBOXマーク（インナーボックスマーク）パターンなどを実際に形成することなく、かかるマークパターンを用いたときと同等の空間像計測が可能となる。

【0038】この場合において、請求項15に記載の發

明の如く、前記空間像の形成と前記光電変換信号の検出とを、前記投影光学系のイメージフィールド内の異なる位置に投影される前記パターンの空間像について繰り返し行い、前記所定の処理として、前記繰り返しにより得られた複数の光電変換信号それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各光電変換信号に対応する空間像の位置をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることがある。

【0039】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項16に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである場合に、前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記各ラインパターンの線幅異常値を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めることがある。

【0040】コマ収差は、レンズの種々の輪帯で倍率が異なることによるレンズの収差であり、投影光学系の主軸から離れた距離の画像の部分に生じる。従って、光軸から離れた位置では、ラインアンドスペースパターンの空間像の内、各ラインパターンの線幅はコマ収差に応じて異なることになる。従って、スライス法を用いてエッジ検出の手法により各ラインパターンの線幅異常値を検出する本発明によれば、コマ収差を精度良く、かつ容易に計測することができる。

【0041】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項17に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に周期性を有するラインアンドスペースパターンである場合に、前記所定の処理として、前記光電変換信号の前記各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、前記ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めることがある。空間像計測の対象となるパターンの走査方向の幅が狭いほど、コマ収差の影響を大きく受けるので、ラインアンドスペースパターンの各ラインパターンの空間像に対するコマ収差の影響と、ラインアンドスペースパターンの全体を1つのパターンと見た場合のそのパターンの空間像に対するコマ収差の影響とは相違する。従って、光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、ラインアンドスペースパターンの全体の幅に対応する第2周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求める本発明によれば、位相検出の手法により、投影光学系のコマ収差を精度良く求めることができる。

【0042】上記請求項8に記載の発明に係る結像特性計測方法において、請求項18に記載の発明の如く、前記パターンは、前記第2方向に対応する方向に所定間隔

で配置された線幅の異なる少なくとも2種類のラインパターンを有する対称マークパターンである場合、前記所定の処理として、前記光電変換信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて前記パターンの空間像の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて前記投影光学系のコマ収差を求めることがある。走査方向の幅が細いラインパターンの空間像ほどコマ収差の影響により大きく位置ずれする結果、走査方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる複数種類のラインパターンを有する対称マークパターンの空間像は、コマ収差が大きいほどその対称性が大きくずれる。従って、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、前記対称性マークパターンの空間像の対称性のずれを算出し、その算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求める本発明によれば、投影光学系のコマ収差を精度良く求めることができる。

【0043】請求項19に記載の発明は、投影光学系によって形成される所定のパターンの空間像を計測する空間像計測装置であって、前記パターンの空間像を前記投影光学系を介して像面上に形成するため、前記パターンを照明する照明装置(10)と；前記投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びるとともに、これに垂直な第2方向の幅が零より大きく前記照明光の波長 $\lambda$ を前記投影光学系の開口数N. A. で除した( $\lambda/N. A.$ )以下である、少なくとも1つのスリットを有するスリット板(90)と；前記スリット板を透過した前記照明光を光電変換して、前記スリットを透過した前記照明光の強度に応じた光電変換信号を出力する光電変換素子(24)と；前記照明装置により前記パターンが照明され、前記像面上に前記空間像が形成された状態で、前記像面近傍の前記2次元平面内で前記スリット板を前記第2方向に走査するとともに、前記光電変換素子からの光電変換信号に基づいて前記空間像に対応する光強度分布を計測する処理装置(20)と；を備える。

【0044】これによれば、照明装置によって所定のパターンが照明され、該パターンの空間像が投影光学系を介して像面上に形成される。そして、処理装置により、形成された空間像に対して投影光学系の光軸に垂直な2次元平面内で第1方向に延びる少なくとも1つのスリットを有するスリット板が像面近傍の前記2次元平面内で第2方向に走査されるとともに、光電変換素子からの光電変換信号(走査中にスリットを透過した照明光を光電変換した電気信号)に基づいて空間像に対応する光強度分布が計測される。すなわち、このようにして、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像が計測される。また、この場合、スリット板に形成されたスリットの走査方向の幅が、( $\lambda/N. A.$ )以下であるので、上記請求項3と同様に、実用上十分な高い精度で空間像を計測することができる。

【0045】請求項20に記載の発明は、マスク(R)

に形成された回路パターンを投影光学系(PL)を介して基板(W)に転写する露光装置であって、前記基板を保持する基板ステージ(WST)と；前記スリット板(90)が前記基板ステージと一体で移動可能に構成された請求項19に記載の空間像計測装置とを備える。

【0046】これによれば、スリット板が基板ステージと一体で移動可能に構成された請求項18に記載の空間像計測装置を備えることから、例えば、マスクに種々の計測用パターンを形成し、基板ステージと一体でスリット板を移動させつつ、空間像計測装置により、種々の計測用パターンの空間像を高精度に計測することが可能になる。従って、この計測結果を利用して、例えば投影光学系の結像特性の初期調整等を行うことにより、結果的に露光精度の向上が可能となる。

【0047】この場合において、請求項21に記載の発明の如く、前記空間像計測装置を用いて、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された前記光強度分布のデータに基づいて前記投影光学系の結像特性を求める制御装置(20)を更に備えることとすることができる。かかる場合には、制御装置により、種々のマークパターンの空間像に対応する光強度分布を計測し、その計測された光強度分布のデータに基づいて投影光学系の結像特性が求められる。そのため、必要なときに投影光学系の結像特性を求めることが可能となり、この求められた結像特性に応じて露光開始に先立って投影光学系の結像特性を調整することが可能となる。従って、露光精度の向上が可能となる。

【0048】上記請求項20に記載の発明に係る露光装置において、請求項22に記載の発明の如く、前記基板ステージ上のマークの位置を検出するマーク検出系(ALG1又はALG2)と；前記空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置と前記マーク検出系との相対位置関係を検出する制御装置を更に備えることとすることができる。かかる場合には、制御装置により、空間像計測装置を用いて、前記投影光学系による前記マスクのパターンの投影位置、すなわち前記パターンの空間像の結像位置とマーク検出系との相対位置関係(すなわち、マーク検出系のいわゆるベースライン量)が検出される。この場合、ベースライン量の計測に当たり、マスクパターンの投影位置を、空間像計測装置により直接的に計測することができるで、基準マーク板とレチクル顕微鏡とを用いてマスクパターンの投影位置を間接的に計測する場合に比べて、精度の高いベースライン量の計測が可能である。従って、このベースライン量を用いて、露光時等に基板の位置を制御することにより、マスクと基板との重ね合せ精度の向上により露光精度の向上が可能となる。

【0049】

【発明の実施の形態】《第1の実施形態》以下、本発明の第1の実施形態を図1ないし図34に基づいて説明す

る。

【0050】図1には、第1の実施形態に係る露光装置100の概略的な構成が示されている。この露光装置100は、ステップ・アンド・スキャン方式の走査型投影露光装置、すなわちいわゆるスキャニング・ステッパーである。

【0051】この露光装置100は、光源及び照明光学系を含む照明系10、マスクとしてのレチクルRを保持するレチクルステージRST、投影光学系PL、基板としてのウエハWを保持してXY平面内を自在に移動可能な基板ステージとしてのウエハステージWST、及びこれらを制御する制御系等を備えている。

【0052】前記照明系10は、光源、照度均一化光学系(コリメータレンズ、フライアイレンズ等から成る)、リレーレンズ系、照明視野絞りとしてのレチクルブラインド及びコンデンサレンズ系等(いずれも図1では図示省略)を含んで構成されている。

【0053】前記光源としては、ここでは、一例として、KrFエキシマレーザ光(波長248nm)又はArFエキシマレーザ光(波長193nm)を出力するエキシマレーザ光源が用いられるものとする。

【0054】前記レチクルブラインドは、開口形状が固定の不図示の固定レチクルブラインドと開口形状が可変の可動レチクルブラインド12(図1では図示省略、図2参照)とから構成されている。固定レチクルブラインドは、レチクルRのパターン面に対する共役面から僅かにデフォーカスした面に配置され、レチクルR上の長方形スリット状の照明領域IARを規定する矩形開口が形成されている。また、可動レチクルブラインド12は、固定レチクルブラインドの近傍のレチクルRのパターン面に対する共役面に配置され、走査露光時の走査方向(ここでは、図1における紙面直交方向であるY軸方向とする)及び非走査方向(図1における紙面左右方向であるX軸方向)にそれぞれ対応する方向の位置及び幅が可変の開口部を有する。

【0055】照明系10によると、光源で発生した露光光としての照明光(以下、「照明光IL」と呼ぶ)は不図示のシャッターを通過した後、照度均一化光学系により照度分布がほぼ均一な光束に変換される。照度均一化光学系から射出された照明光ILは、リレーレンズ系を介して前記レチクルブラインドに達する。このレチクルブラインドを通過した光束は、リレーレンズ系、コンデンサレンズ系を通過して回路パターン等が描かれたレチクルRの照明領域(X軸方向に細長く伸びY軸方向の幅が所定幅の長方形スリット状の照明領域)IARを均一な照度で照明する。

【0056】なお、可動レチクルブラインド12は、走査露光の開始時及び終了時に主制御装置20によって制御され、照明領域IARを更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。ま

た、本実施形態では、可動レチクルブラインド12が、後述する空間像計測器による空間像の計測の際の照明領域の設定にも用いられる。

【0057】前記レチクルステージRST上には、レチクルRが、例えば真空吸着(又は静電吸着)により固定されている。レチクルステージRSTは、ここでは、リニアモータ等を含む不図示のレチクルステージ駆動系により、後述する投影光学系PLの光軸AXに垂直なXY平面内で2次元的に(X軸方向及びこれに直交するY軸方向及びXY平面に直交するZ軸回りの回転方向(θz方向)に)微少駆動可能であるとともに、不図示のレチクルベース上をY軸方向に指定された走査速度で移動可能となっている。このレチクルステージRSTは、レチクルRの全面が少なくとも投影光学系PLの光軸AXを横切ることができるだけのY軸方向の移動ストロークを有している。

【0058】レチクルステージRST上には、レチクルレーザ干渉計(以下、「レチクル干渉計」という)13からのレーザビームを反射する移動鏡15が固定されており、レチクルステージRSTのXY面内の位置はレチクル干渉計13によって、例えば0.5~1nm程度の分解能で常時検出される。ここで、実際には、レチクルステージRST上には走査露光時の走査方向(Y軸方向)に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向(X軸方向)に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、レチクル干渉計13はY軸方向に1軸、X軸方向には2軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡15、レチクル干渉計13として示されている。

【0059】レチクル干渉計13からのレチクルステージRSTの位置情報は、ワークステーション(又はマイクロコンピュータ)から成る主制御装置20に送られ、主制御装置20ではレチクルステージRSTの位置情報に基づいてレチクルステージ駆動系を介してレチクルステージRSTを駆動制御する。

【0060】前記投影光学系PLは、レチクルステージRSTの図1における下方に配置され、その光軸AXの方向がZ軸方向とされ、ここでは両側テレセントリックな縮小系であり、光軸AX方向に沿って所定間隔で配置された複数枚のレンズエレメントから成る屈折光学系が使用されている。この投影光学系PLの投影倍率は、ここでは、一例として1/5となっている。このため、照明系10からの照明光ILによってレチクルR上のスリット状照明領域IARが照明されると、このレチクルRを通過した照明光ILにより、投影光学系PLを介してそのスリット状照明領域IAR内のレチクルRの回路パターンの縮小像(部分倒立像)が表面にフォトレジストが塗布されたウエハW上の前記照明領域IARに共役な露光領域IAに形成される。

【0061】前記ウエハステージWSTは、ステージベース16上面に沿って例えば磁気浮上型2次元リニアア

クチュエータから成る不図示のウエハステージ駆動系により、XY2次元面内（θz回転を含む）で自在に駆動されるようになっている。ここで、2次元リニアアクチュエータは、X駆動コイル、Y駆動コイルの他、Z駆動コイルをも有しているため、ウエハステージWSTは、Z、θx、θyの3自由度方向にも微少駆動が可能な構成となっている。

【0062】ウエハステージWST上には、ウエハホルダ25が載置され、このウエハホルダ25によってウエハWが真空吸着（又は静電吸着）によって保持されている。

【0063】なお、ウエハステージWSTに代えて、リニアモータあるいは平面モータ等の駆動系によってXY2次元面内でのみ駆動される2次元移動ステージを用いる場合には、ウエハホルダ25を、Z、θx、θyの3自由度方向にボイスコイルモータ等によって微少駆動されるZ・レベリングテーブルを介してその2次元移動ステージ上に搭載すれば良い。

【0064】前記ウエハステージWST上には、ウエハレーザ干渉計（以下、「ウエハ干渉計」という）31からのレーザビームを反射する移動鏡27が固定され、外部に配置されたウエハ干渉計31により、ウエハステージWSTのXY面内の位置が例えば0.5～1nm程度の分解能で常時検出されている。

【0065】ここで、実際には、ウエハステージWST上には、走査露光時の走査方向であるY軸方向に直交する反射面を有する移動鏡と非走査方向であるX軸方向に直交する反射面を有する移動鏡とが設けられ、ウエハ干渉計31はY軸方向に1軸、X軸方向には2軸設けられているが、図1ではこれらが代表的に移動鏡27、ウエハ干渉計31として示されている。ウエハステージWSTの位置情報（又は速度情報）は主制御装置20に送られ、主制御装置20では前記位置情報（又は速度情報）に基づいて不図示のウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTのXY面内の位置を制御する。

【0066】また、ウエハステージWST上には、投影光学系PLの結像特性の計測に用いられる空間像計測器59が設けられている。ここで、この空間像計測器59の構成について詳述する。この空間像計測器59は、図2に示されるように、ウエハステージWSTの一端部上面に設けられた上部が開口した突設部58a部分に設けられている。この空間像計測器59は、突設部58aの開口を塞ぐ状態で上方から嵌め込まれた平面視長方形の受光ガラス82、この受光ガラス82の上面に形成され、その一部にスリット22が形成された遮光膜を兼ねる反射膜83、スリット22下方ウエハステージWST内部に配置されたレンズ84、86から成るリレー光学系、該リレー光学系（84、86）によって所定光路長分だけリレーされる照明光束（像光束）の光路を折り曲げる折り曲げミラー88（ここで、レンズ84、86、

及びミラー88によって受光光学系が構成される）、及び光電変換素子としての光センサ24等を含んで構成されている。

【0067】前記受光ガラス82の素材としては、ここでは、Krfエキシマレーザ光、あるいはArfエキシマレーザ光の透過性の良い、合成石英、あるいはホタル石などが用いられる。また、光センサ24としては、微弱な光を精度良く検出することが可能な光電変換素子（受光素子）、例えばフォトマルチプライヤなどが用いられる。なお、本実施形態では、受光ガラス82及び反射膜83によって、スリット板が形成されている。以下の説明においては、受光ガラス82と反射膜83とから成るスリット板を、適宜「スリット板90」と呼ぶものとする。また、前述の如く、スリット22は反射膜83に形成されているが、以下においては、便宜上スリット板90にスリット22が形成されているものとして説明を行う。

【0068】本実施形態では、後述する、レチクルRに形成された計測用パターンの投影光学系PLを介しての投影像（空間像）の計測の際に、投影光学系PLを透過してきた照明光ILによって空間像計測器59を構成するスリット板90が照明されると、そのスリット板90上のスリット22を透過した照明光ILが上記受光光学系（84、86、88）を介して光センサ24で受光され、該光センサ24からその受光量に応じた光電変換信号（光量信号）Pが主制御装置20に出力されるようになっている。

【0069】なお、光センサ24は、必ずしもウエハステージWSTの内部に設ける必要はなく、例えば、図3に示される空間像計測器59'の如く、光センサ24をウエハステージWSTの外部に配置しても良い。図3において、ウエハステージWSTには、その上面がウエハWの表面とほぼ同一面とされた2つの凸部58a、58bが設けられている。凸部58aには、図2の場合と同様にして構成されたスリット板90が設けられ、該スリット板90下方のウエハステージWSTの内部には、レンズ84、86及びミラー88が図2と同様の位置関係で配置されている。この場合、ウエハステージWSTの内部には、ライトガイド85も収納されている。このライトガイド85は、その入射端85aが、スリット22が形成された受光面に共役な位置に配置されている。また、このライトガイド85の射出端85bは、凸部58bの上面に固定された送光レンズ87のほぼ真下に配置されている。

【0070】送光レンズ87の上方には、該送光レンズ87に比べて大径の受光レンズ89が配置されている。この受光レンズ89の上方の射出端85bと共役な位置には、光センサ24が配置されている。これら受光レンズ89及び光センサ24は、上記の位置関係を保ってケース92内に収納され、該ケース92は不図示の固定部

材に固定されている。

【0071】この図3の空間像計測器59'では、後述する、レチクルRに形成された計測用パターンの投影光学系PLを介しての投影像(空間像)の計測の際に、投影光学系PLを透過してきた照明光ILによって空間像計測器59'を構成するスリット板90が照明されると、そのスリット板90上のスリット22を透過した照明光ILがレンズ84、ミラー88及びレンズ86を介してライトガイド85の入射端85aに入射する。ライトガイド85で導かれた光は、その射出端85bから射出された後、送光レンズ87を介してウェハステージWSTの外部に導き出される。そして、そのウェハステージWSTの外部に導き出された光は、受光レンズ89を介して光センサ24によって受光され、該光センサ24からその受光部に応じた光電変換信号(光量信号)Pが主制御装置20に出力される。

【0072】この場合、計測用パターンの投影像の計測はスリットスキャン方式により行われるので、その際には、送光レンズ87に対して受光レンズ89及び光センサ24が、移動することになる。そこで、この空間像計測器59'では、所定の範囲内で移動する送光レンズ87を介した光がすべて受光レンズ89に入射するよう、各レンズの大きさが設定されている。

【0073】このように、空間像計測器59'では、スリット板90、レンズ84、86、ミラー88、ライトガイド85及び送光レンズ87により、スリット22を介した光をウェハステージWST外に導出する光導出部が構成され、受光レンズ89及び光センサ24によって、ウェハステージWST外へ導出された光を受光する受光部が構成されている。この場合、これら光導出部と受光部とは、機械的に分離されている。そして、空間像計測に際してのみ、光導出部と受光部とは、送光レンズ87と受光レンズ89とを介して光学的に接続される。

【0074】すなわち、空間像計測器59'では、光センサ24がウェハステージWSTの外部の所定位置に設けられているため、光センサ24の発熱に起因してレーザ干渉計31の計測精度等に悪影響を与えることがない。また、ウェハステージWSTの外部と内部とをライトガイド等により接続していないので、ウェハステージWSTの外部と内部とがライトガイドにより接続された場合のようにウェハステージWSTの駆動精度が悪影響を受けることもない。

【0075】なお、空間像計測器59(又は59')を構成するスリット板90上のスリット22の形状、寸法等、及び空間像計測器59(又は59')を用いて行われる空間像計測方法、結像特性の計測方法などについては、後に詳述する。

【0076】図1に戻り、投影光学系PLの側面には、ウェハW上のアライメントマーク(位置合わせマーク)を検出するマーク検出系としてのオフアクシス・アライ

メント顕微鏡ALG1が設けられている。本実施形態では、このアライメント顕微鏡ALG1として、画像処理方式のFIA(Filed Image Alignment)系のアライメントセンサが用いられている。このアライメント顕微鏡ALG1は、図2に示されるように、アライメント用光源32、ハーフミラー34、第1対物レンズ36、第2対物レンズ38、撮像素子(CCD)40等を含んで構成されている。ここで、光源32としては、ブロードバンドの照明光を出射するハロゲンランプ等が用いられる。このアライメント顕微鏡ALG1では、図4に示されるように、光源32からの照明光により、ハーフミラー34、第1対物レンズ36を介してウェハW上のアライメントマークMwを照明し、そのアライメントマーク部分からの反射光を第1対物レンズ36、ハーフミラー34、第2対物レンズ38を介して撮像素子40で受光する。これにより、撮像素子の受光面にアライメントマークMwの明視野像が結像される。そして、この明視野像に対応する光電変換信号、すなわちアライメントマークMwの反射像に対応する光強度信号が撮像素子40から主制御装置20に供給される。主制御装置20では、この光強度信号に基づき、アライメント顕微鏡ALGの検出中心を基準とするアライメントマークMwの位置を算出するとともに、その算出結果とそのときのウェハ干渉計31の出力であるウェハステージWSTの位置情報に基づいて、ウェハ干渉計31の光軸で規定されるステージ座標系におけるアライメントマークMwの座標位置を算出するようになっている。

【0077】更に、本実施形態の露光装置100では、図1に示されるように、主制御装置20によってオンオフが制御される光源を有し、投影光学系PLの結像面に向けて多数のピンホールまたはスリットの像を形成するための結像光束を、光軸AXに対して斜め方向より照射する照射光学系60aと、それらの結像光束のウェハW表面での反射光束を受光する受光光学系60bとから成る斜入射光式の多点焦点位置検出系(フォーカスセンサ)が設けられている。主制御装置20では、投影光学系PLにフォーカス変動が生じた場合には、受光光学系60b内の図示しない平行平板の反射光束の光軸に対する傾きを制御することにより、投影光学系PLのフォーカス変動に応じて焦点位置検出系(60a、60b)にオフセットを与えてそのキャリブレーションを行うようになっている。なお、本実施形態の焦点位置検出系(60a、60b)と同様の多点焦点位置検出系(フォーカスセンサ)の詳細な構成は、例えば特開平6-283403号公報等に開示されている。

【0078】主制御装置20では、後述する走査露光時等に、受光光学系60bからの焦点ずれ信号(デフォーカス信号)、例えばSカーブ信号に基づいて焦点ずれが零となるようにウェハステージWSTのZ位置及びピッキング量( $\theta_x$ 回転量)及びローリング量( $\theta_y$ 回転

盤)を、不図示のウエハステージ駆動系を介して制御することにより、オートフォーカス(自動焦点合わせ)及びオートレベリングを実行する。

【0079】次に、本実施形態の露光装置100における露光工程の動作について簡単に説明する。

【0080】まず、不図示のレチクル搬送系によりレチクルRが搬送され、ローディングポジションにあるレチクルステージRSTに吸着保持される。次いで、主制御装置20により、ウエハステージWST及びレチクルステージRSTの位置が制御され、レチクルR上に形成された不図示のレチクルアライメントマークの投影像(空間像)が空間像計測器59を用いて後述するようにして計測され(図2参照)、レチクルパターン像の投影位置が求められる。すなわち、レチクルアライメントが行われる。

【0081】次に、主制御装置20により、空間像計測器59がアライメント顕微鏡ALG1の直下へ位置するように、ウエハステージWSTが移動され、アライメント光学系ALG1によって空間像計測器59の位置基準となるスリット22が検出される。図5には、このアライメント光学系ALG1によってスリット22が検出されている様子が示されている。主制御装置20では、このアライメント顕微鏡ALG1の検出信号及びそのときのウエハ干渉計31の計測値、並びに先に求めたレチクルパターン像の投影位置に基づいて、レチクルRのパターン像の投影位置とアライメント光学系ALG1との相対位置、すなわちアライメント顕微鏡ALG1のベースライン量を求める。

【0082】かかるベースライン計測が終了すると、主制御装置20により、例えば特開昭61-44429号公報などに詳細に開示されるEGA(エンハンスト・グローバル・アライメント)等のウエハアライメントが行われ、ウエハW上の全てのショット領域の位置が求められる。なお、このウエハアライメントに際して、ウエハW上の複数のショット領域のうちの予め定められた所定のサンプルショットのウエハアライメントマークMwがアライメント顕微鏡ALG1を用いて、前述した如くして計測される(図2参照)。

【0083】次いで、主制御装置20では、上で求めたウエハW上の各ショット領域の位置情報及びベースライン量に基づいて、干渉計31、13からの位置情報をモニタしつつ、ウエハステージWSTを第1ショット領域の走査開始位置に位置決めるとともに、レチクルステージRSTを走査開始位置に位置決めして、その第1ショット領域の走査露光を行う。

【0084】すなわち、主制御装置20では、レチクルステージRSTとウエハステージWSTとのY軸方向逆向きの相対走査を開始し、両ステージRST、WSTがそれぞれの目標走査速度に達すると、露光光ELによってレチクルRのパターン領域が照明され始め、走査露光

が開始される。この走査露光の開始に先立って、光源の発光は開始されているが、主制御装置20によってレチクルブラインドを構成する可動ブラインドの各ブレードの移動がレチクルステージRSTの移動と同期制御されているため、レチクルR上のパターン領域外への露光光ELの照射が遮光されることとは、通常のスキヤニング・ステッパと同様である。

【0085】主制御装置20では、特に上記の走査露光時にレチクルステージRSTのY軸方向の移動速度VrとウエハステージWSTのX軸方向の移動速度Vwとが投影光学系PLの投影倍率に応じた速度比に維持されるようにレチクルステージRST及びウエハステージWSTを同期制御する。

【0086】そして、レチクルRのパターン領域の異なる領域が紫外パルス光で逐次照明され、パターン領域全面に対する照明が完了することにより、ウエハW上の第1ショット領域の走査露光が終了する。これにより、レチクルRの回路パターンが投影光学系PLを介して第1ショット領域に縮小転写される。

【0087】こうして第1ショット領域の走査露光が終了すると、ウエハステージWSTを第2ショット領域の走査開始位置へ移動させるショット間のステッピング動作を行う。そして、その第2ショット領域の走査露光を上述と同様にして行う。以後、第3ショット領域以降も同様の動作を行う。

【0088】このようにして、ショット間のステッピング動作とショットの走査露光動作とが繰り返され、ステップアンドスキャン方式でウエハW上の全てのショット領域にレチクルRのパターンが転写される。

【0089】ここで、上記の走査露光中には、投影光学系PLに一体的に取付けられたフォーカスセンサ(60a、60b)によってウエハW表面と投影光学系PL(その像面)との間隔、XY平面(像面)に対する傾斜が計測され、主制御装置20によってウエハW表面と投影光学系PLとの間隔、平行度が常に一定になるようにウエハステージWSTが制御される。

【0090】ところで、上記の走査露光中に、レチクルRのパターンとウエハW上のショット領域に既に形成されたパターンとが正確に重ね合わせられるためには、投影光学系PLの結像特性やベースライン量が正確に計測されていること、及び投影光学系PLの結像特性が所望の状態に調整されていることなどが重要である。

【0091】本実施形態では、上記の結像特性の計測に、空間像計測器59又は59'(以下、代表して「空間像計測器59」と記す)が用いられる。以下、この空間像計測器59による空間像計測、及び投影光学系PLの結像特性の計測等について詳述する。

【0092】図2には、空間像計測器59を用いて、レチクルRに形成された計測用パターンの空間像が計測されている最中の状態が示されている。レチクルRとして

は、空間像計測専用のもの、あるいはデバイスの製造に用いられるデバイスレチクルに専用の計測用マークを形成したものなどが用いられる。これらのレチクルの代わりに、レチクルステージR S Tにレチクルと同材質のガラス素材から成る固定のマーク板（レチクルフィディューシャルマーク板とも呼ばれる）を設け、このマーク板に計測用マーク（計測用パターン）を形成したものを用いても良い。

【0093】ここで、レチクルRには、図2に示されるように、所定の箇所にX軸方向に周期性を有するラインアンドスペースマークから成る計測用パターンPMが形成されているものとする。また、空間像計測器59のスリット板90には、図6(A)に示されるように、Y軸方向に伸びる所定幅2Dのスリット22が形成されているものとする。なお、以下では、ラインアンドスペースを適宜「L/S」と略述する。

【0094】空間像の計測に当たり、主制御装置20により、可動レチクルブラインド12が不図示のブラインド駆動装置を介して駆動され、レチクルRの照明光ILの照明領域が計測用パターンPM部分のみに規定される（図2参照）。この状態で、照明光ILがレチクルRに照射されると、図2に示されるように、計測用パターンPMによって回折、散乱した光（照明光IL）は投影光学系PLにより屈折され、該投影光学系PLの像面に計測用パターンPMの空間像（投影像）PM'が形成される。このとき、ウエハステージWSTは、空間像計測器59のスリット板90上のスリット22の+X側（又は-X側）に前記空間像PM'が形成される位置に設定されているものとする。このときの空間像計測器59の平面図が図6(A)に示されている。

【0095】そして、主制御装置20により、ウエハステージ駆動系を介してウエハステージWSTが図6(A)中に矢印Fで示されるように+X方向に駆動されると、スリット22が空間像PM'に対してX軸方向に走査される。この走査中に、スリット22を通過する光（照明光IL）がウエハステージWST内の受光光学系（又は図3の場合、光導出部及び受光レンズ）を介して光センサ24で受光され、その光電変換信号が主制御装置20に供給される。主制御装置20では、その光電変換信号に基づいて不図示の信号処理系を介して空間像PM'に対応する光強度分布を計測する。

【0096】図6(B)には、上記の空間像計測の際に

波長(nm)	投影レンズの開口数	(A)波長/投影レンズの開口数	B=A×0.8
248	0.68	364	291
248	0.75	331	264
193	0.65	297	238
193	0.75	257	208
193	0.85	227	182

【0106】上記表1からもわかるように、開口数、波長によって十分なスリット幅（開口サイズ：表1中のB）は異なるが、概略300nm以下が適切な値である。

得られる光電変換信号（光強度信号）Pの一例が示されている。

【0097】この場合、空間像PM'はスリット22の走査方向（走査露光時の走査方向ではなく、上記の空間像に対する走査方向、すなわちX軸方向）の幅（2D）の影響で像が平均化する。

【0098】従って、スリットをp(x)、空間像の強度分布をi(x)、観測される光強度信号をm(x)とすると、空間像の強度分布i(x)と観測される強度信号m(x)の関係は次の(1)式で表すことができる。この(1)式において、強度分布i(x)、強度信号m(x)の単位は単位長さ当たりの強度とする。

【0099】

【数1】

$$m(x) = \int p(x-u) \cdot i(u) du \quad \dots(1)$$

【0100】

【数2】

$$p(x) = \begin{cases} 1(|x| \leq D) \\ 0(|x| > D) \end{cases} \quad \dots(2)$$

【0101】すなわち、観測される強度信号m(x)はスリットp(x)と空間像の強度分布i(x)のコンポリューションになる。

【0102】従って、計測精度の面からは、スリットの走査方向の幅（以下、単に「スリット幅」と呼ぶ）2Dは小さい程良い。

【0103】発明者は、スリット幅2Dを、照明光ILの波長λ、投影光学系PLの開口数N.A.の関数f(λ/N.A.)として、種々のシミュレーション及び実験等を繰り返し行った。その結果、スリット幅2D=n・(λ/N.A.)とし、かつ係数n≤1とした場合に、十分に実用的であり、特にn≤0.8であればより実用的であることが確認された。ここで、実用的であるとは、空間像→空間像強度信号の変換の際に像プロファイルの劣化が少なく、光センサ24（光電変換素子）以降の信号処理系には大きなダイナミック・レンジが不要となり十分な精度が得られることを意味する。

【0104】上記の良好な結果の一例を示せば、例えば、次の表1のようになる。

【0105】

【表1】

る。この程度のスリットは市販のクロムレチクル（マスクブランクスとも呼ばれる。）を用いて製作可能である。

【0107】クロムレチカルは、通常100nm程度の膜厚のクロム膜が石英基板に蒸着されている。石英基板は、2.286mm、3.048mm、4.572mm、6.35mm厚のものが標準的である。

【0108】上述の如く、スリット幅2Dは、小さほど良く、本実施形態のようにフォトマルチプライヤを光センサ24として用いる場合には、スリット幅が非常に小さくなっても走査速度を遅くして計測に時間を掛けば光量(光強度)の検出は可能である。しかしながら、現実には、スループットの面から空間像計測時の走査速度には、一定の制約があるため、スリット幅2Dがあまりにも小さいと、スリット22を透過する光量が小さくなり過ぎて、計測が困難となってしまう。

【0109】発明者がシミュレーション及び実験等により得た知見によれば、スリット幅2Dの最適値は、露光装置の解像限界ピッチ(L/Sパターンのピッチ)の半分程度となることが確認された。これについては、後で更に詳述する。

【0110】これまでの説明から明らかなように、本実施形態では、照明光学系10、空間像計測器59(スリット板90及び光センサ24を含む)、ウェハステージWST及び主制御装置20によって空間像計測装置が構成されている。また、この内、主制御装置20によって、空間像計測装置の一部を成す処理装置が構成されている。

【0111】上述した空間像計測装置及び空間像計測方法は、a. ベストフォーカス位置の検出、b. パターン像の結像位置の検出、c. アライメント顕微鏡ALGのベースライン計測等に用いられる。

【0112】本実施形態の露光装置100におけるc.ベースライン計測については既に説明したので、以下、上記a. ベストフォーカス位置の検出及びb. パターン像の結像位置の検出について、実施例を交えながら説明する。

〈ベストフォーカス位置の検出〉このベストフォーカス位置の検出は、例えばA. 投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出及び最良結像面(像面)の検出及びB. 球面収差測定などの目的に用いられる。

【0113】図7～図12には、ライン幅0.2μm、デューティ比50%のL/Sマークの空間像を前述した空間像計測方法により計測した場合に対応する結像シミュレーションの結果が示されている。このシミュレーションの条件は、照明光の波長248nm、投影光学系のN.A.=0.68、照明のコヒーレンスファクタ=0.85で、スリット幅2D=0.3μmである。この条件は、表1のBの条件に近い。なお、図7～図12において、横軸はスリットのX位置(μm)を示し、縦軸は光強度(エネルギー値)を示す。

【0114】図7は、ベストフォーカス位置でのシミュレーション結果を示す。この図7において、実線で示さ

れる波形P2は0.2μmL/Sの空間像で(1)式のi(x)に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査(空間像計測)によって得られる光強度信号で(1)式のm(x)に相当する。

【0115】図8は図7の強度信号P3、すなわちm(x)をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図8において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図8では、P4～P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

【0116】図9はベストフォーカス位置から0.2μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す。この図9において、実線で示される波形P2は0.2μmL/Sの空間像で(1)式のi(x)に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査(空間像計測)によって得られる光強度信号で(1)式のm(x)に相当する。

【0117】図10は図9の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図10において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図10では、P4～P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

【0118】図11はベストフォーカス位置から0.3μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す。この図11において、実線で示される波形P2は0.2μmL/Sの空間像で(1)式のi(x)に相当し、点線で示される波形P3がスリットの走査(空間像計測)によって得られる光強度信号で(1)式のm(x)に相当する。

【0119】図12は図11の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す。図12において、破線で示される波形P4は0次周波数成分を、一点鎖線で示される波形P5は1次周波数成分を、二点鎖線で示される波形P6は2次周波数成分を、実線で示される波形P7は3次周波数成分を、それぞれ示す。なお、図12では、P4～P7は、識別を容易にするため、1.0だけ嵩上げして示されている。

【0120】図7と図9とを比較するとわかるように、0.2μmのデフォーカスによって明らかに像の形状が崩れている。また、図9と図11とを比較すると、デフォーカス量の増大に伴って明らかに像の形状がさらに崩れていることがわかる。

【0121】また、上述のように、光強度信号P3を周波数成分に分離すると、いろいろな信号処理が容易に行える。例えば、1次周波数成分P5と0次周波数成分P4との振幅比、すなわち(1次/0次)の振幅比であるコントラストに着目してみると、図8に示されるベストフォーカス位置の場合のコントラストは、0.43である。また、図10に示されるベストフォーカス位置から0.2μmデフォーカスした場合のコントラストは、0.24である。また、図12に示されるベストフォーカス位置から0.3μmデフォーカスした場合のコントラストは、0.047である。

【0122】このように、(1次/0次)の振幅比であるコントラストは、フォーカス位置によって敏感に変化するので強度信号からベストフォーカス位置を決定するのに便利である。すなわち、ベストフォーカス位置は(1次/0次)の振幅比であるコントラストが最大となるフォーカス位置を求ることによって検出可能である。

【0123】そこで、本実施形態では、次のようにして投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行う。

【0124】このベストフォーカス位置の検出には、例えば、ウエハ上でライン幅0.2μm(レチクル上で1μm)、デューティ比50%のL/Sマークが、計測用パターンPMとして形成された計測用レチクル(便宜上レチクルR'とする)が用いられる。このベストフォーカス位置の検出は、上述したシミュレーションと全く同じ条件の下で行われるものとする。

【0125】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR'がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR'上の計測用パターンPMが、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。

【0126】次に、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルR'に照射して、前述と同様にして、ウエハステージWSTをX軸方向に走査しながら空間像計測器59を用いて、計測用パターンPMの空間像計測を前述と同様にスリットスキャン方式により行う。この際、主制御装置20では、スリット板90のZ軸方向の位置(すなわち、ウエハステージWSTのZ位置)を変化させつつ、複数回繰り返し、各回の光強度信号(光電変換信号)を内部メモリに記憶する。

【0127】そして、主制御装置20では、前記繰り返しにより得られた複数の光強度信号(光電変換信号)をそれぞれフーリエ変換し、それぞれの1次周波数成分と0次周波数成分の振幅比であるコントラストを求める。そして、主制御装置20では、そのコントラストが最大となる光強度信号に対応するウエハステージWSTのZ

位置(すなわち、スリット板90のZ軸方向の位置)を検出し、この位置を投影光学系PLのベストフォーカス位置として決定する。前述の如く、コントラストは、フォーカス位置(デフォーカス量)に応じて敏感に変化するので、投影光学系PLのベストフォーカス位置を精度良く、かつ容易に計測(決定)することができる。

【0128】なお、2次以上の高次の次数の周波数成分の振幅は一般に小さく、電気的なノイズ、光学的なノイズに対する振幅が十分に取れない場合もあるが、S/N比(シグナル/ノイズ)の点で問題がない場合には高次の周波数成分の振幅比の変化を観測してもベストフォーカス位置を求めることができる。計測用パターンであるL/Sマークはライン幅とスペース幅が等しいデューティ比50%のパターンであることが望ましいが、それ以外のデューティ比のマークを用いることも可能である。発明者が実験等の結果得た知見によれば、L/Sマークのラインパターンの配列周期、すなわちマークピッチPは、次の(3)式程度である場合に良好な結果が得られることが判明した。

【0129】

$$P_w = \lambda / N \cdot A \times (1 \sim 1.2) \quad \dots (3)$$

なお、上述したコントラストを用いる方法に限らず、光強度信号P((1)式のm(x))の微分値が最大となるZ位置(フォーカス位置)を検出する手法によってもベストフォーカス位置の検出が可能である。

【0130】また、投影光学系PLの像面形状の検出は、次のようにして行うことができる。

【0131】すなわち、この像面形状の検出に際しては、一例として図13に示されるように、パターン領域PA内に、前述した計測用パターンPMと同一寸法同一周期の計測用パターンPM<sub>1</sub>～PM<sub>n</sub>が形成された計測用レチクルR<sub>1</sub>が用いられる。

【0132】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR<sub>1</sub>がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR<sub>1</sub>の中央に存在する計測用パターンPM<sub>k</sub>が、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM<sub>1</sub>部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルR<sub>1</sub>に照射して、前述と同様にして、スリットスキャン方式により空間像計測器59を用いて計測用パターンPM<sub>1</sub>の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0133】計測用パターンPM<sub>1</sub>を用いたベストフォーカス位置の検出が終了すると、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM<sub>2</sub>部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド12を駆動制御して照

明領域を規定する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャニ方式で計測用パターンPM<sub>2</sub>の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0134】以後、主制御装置20では、上記と同様に、照明領域を変更しつつ、計測用パターンPM<sub>3</sub>～PM<sub>n</sub>について空間像の計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を繰り返し行う。

【0135】これにより得られた各ベストフォーカス位置Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、……、Z<sub>n</sub>に基づいて、所定の統計的処理を行うことにより、投影光学系PLの像面形状を算出する。

【0136】投影光学系PLの像面、すなわち、最良結像面は、光軸からの距離が異なる無数の点（すなわち、いわゆる像の高さが異なる無数の点）におけるベストフォーカス点の集合から成る面であるから、このような手法により、像面形状を容易にかつ正確に求めることができる。

【0137】以上により、前述したA. 投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出及び最良結像面（像面）の検出を行うことができる。

【0138】また、投影光学系PLの球面収差の検出は、次のようにして行うことができる。

【0139】すなわち、この球面収差の検出に際しては、例えば、図14に示されるようにパターン領域PA内のX軸方向のほぼ中央に、Y軸方向に所定距離隔てて2つの計測用パターンPM1、PM2が形成された計測用レチクルR2が用いられる。計測用パターンPM1は、前述した計測用パターンPMと同一寸法同一周期のL/Sパターンである。また、計測用パターンPM2は、計測用パターンと同一寸法のラインパターンが異なる周期（例えば、計測用パターンPM1の周期（マークピッチ）の1.5～2倍程度）でX軸方向に並んだL/Sパターンである。

【0140】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージRST上にレチクルR2がロードされる。次に、主制御装置20では、レチクルR2上の計測用パターンPM1が、投影光学系PLの光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージRSTを移動する。次に、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM1部分のみに照射されるように可動レチクルブライ

ンド12を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置20では、照明光ILをレチクルR2に照射して、前述と同様にして、スリットスキャニ方式により空間像計測器59を用いて計測用パターンPM1の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0141】計測用パターンPM1を用いたベストフォーカス位置の検出が終了すると、主制御装置20では、照明光ILが計測用パターンPM2部分に照射されるようレチクルステージRSTを-Y方向に所定距離移動する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャニ方式で計測用パターンPM2の空間像計測及び投影光学系PLのベストフォーカス位置の検出を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0142】これにより得られた各ベストフォーカス位置Z<sub>1</sub>とZ<sub>2</sub>との差に基づいて、投影光学系PLの球面収差を演算により算出する。

【0143】球面収差は、光学系の開口収差の1つであり、光軸上の物点からの種々の開口を持った光線束が光学系に入射したとき、その対応した像点が1点に結像しない現象である。従って、投影光学系の光軸におけるベストフォーカス位置の検出を、異なるピッチの複数のL/Sパターンについて繰り返し行い、各パターンに対応するベストフォーカス位置の差に基づいて演算により球面収差を簡単に求めることができる。なお、この場合のベストフォーカス位置の差の測定精度は3σ<20nm程度であることが実用上は必要である。

【0144】〈パターン像の結像位置の検出〉パターン像の結像位置の検出は、C. 投影光学系の倍率及びディストーション測定、D. 投影光学系のコマ収差測定、E. 照明テレンズ測定のそれぞれの目的で行われる。

【0145】計測用パターン（計測対象となるマーク）は目的によって様々である。分類すると次の表2のようになる。ここで、空間像計測に基づく、投影光学系の結像特性の計測結果は、前述した焼き付け法による結像特性の計測結果と基本的に一致することが望ましいので、表2では、焼き付け計測用マークとともに空間像計測用マーク（空間像計測用パターン）が示されている。

【0146】

【表2】

目的	焼き付け測定用マーク	空間像計測用マーク
C投影レンズ倍率・ディストーション測定	Box in Box Mark、 大L/Sマーク	Box in Box Mark、 大L/Sマーク
D投影レンズコマ収差測定	Line in Box Mark、 L/Sマーク	Line in Box Mark、 L/Sマーク、大小L/Sマーク
E照明テレンズ測定	Box in Box Mark、 大L/Sマーク	Box in Box Mark、 大L/Sマーク

【0147】次に、投影光学系PLの倍率及びディストーション測定について説明する。この投影光学系PLの倍率及びディストーション測定に際しては、例えば、図

15に示されるように、パターン領域PAの中心部及び4角の部分に、合計5個の150μm角（投影倍率1/5でウエハ面上では30μm角）の正方形マークから成

る計測用パターン $B M_1 \sim B M_5$ が形成された計測用レチクル $R 3$ が用いられる。また、この場合、空間像計測器 $5 9$ を構成するスリット板 $9 0$ 上には、図 $1 6$ に示されるような、 $X$ 軸方向に伸びる所定幅 $W$ 、長さ $L$ のスリット $2 2 a$ と、 $Y$ 軸方向に伸びる所定幅 $W$ 、長さ $L$ のスリット $2 2 b$ とが形成されているとともに、ウエハステージ $W S T$ の内部の受光光学系及び光センサ $2 4$ （又は図 $3$ の光導出部及び受光部）によりスリット $2 2 a$ 、 $2 2 b$ のいずれを透過した光をも受光が可能になっているものとする。ここで、 $W$ は例えば $0.3 \mu m$ であり、 $L$ は例えば $25 \mu m$ である。

【0148】まず、不図示のレチクルローダにより、レチクルステージ $R S T$ 上にレチクル $R 3$ がロードされる。次に、主制御装置 $2 0$ では、レチクル $R 3$ の中央に存在する計測用パターン $B M_1$ の中心が、投影光学系 $P L$ の光軸上にほぼ一致するように、レチクルステージ $R S T$ を移動する。次に、主制御装置 $2 0$ では、照明光 $I L$ が計測用パターン $B M_1$ を含む計測用パターン $B M_1$ より一回り大きい矩形領域部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド $1 2$ を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、主制御装置 $2 0$ では、照明光 $I L$ をレチクル $R 3$ に照射する。これにより、図 $1 6$ に示されるように、計測用パターン $B M_1$ の空間像 $B M_1'$ 、すなわちほぼ $30 \mu m$ 角の正方形状のパターン像が形成される。

【0149】この状態で、主制御装置 $2 0$ では、図 $1 6$ に矢印 $A$ で示されるように、ウエハステージ $W S T$ を $X$ 軸方向に走査しながら空間像計測器 $5 9$ を用いて計測用パターン $P M_1$ の空間像計測を行い、その計測により得られた光強度信号 $m(x)$ をメモリに記憶する。次に、主制御装置 $2 0$ では、得られた光強度信号 $m(x)$ に基づき、例えば公知の位相検出の手法により、計測用パターン $P M_1$ の結像位置を求める。ここで、この位相検出の手法としては、例えば、光強度信号 $m(x)$ をフーリエ変換して得られる1次周波数成分（これは、正弦波とみなせる）とこれと同一周波数の基準となる正弦波との積の例えは1周期分の和を求めるとともに、前記1次周波数成分とこれと同一周期の基準となる余弦波との積の例えは1周期分の和を求める。そして、得られた和同士を除算して得られた商の逆正接（アークタンジェント）を求めることにより、1次周波数成分の基準信号に対する位相差を求め、この位相差に基づいて計測用パターン $P M_1$ の $X$ 位置 $x_1$ を求めるという一般的な方法を用いることができる。

【0150】次に、主制御装置 $2 0$ では、ウエハステージ $W S T$ を $Y$ 軸方向に走査しながら空間像計測器 $5 9$ を用いて計測用パターン $P M_1$ の空間像計測を行い、その計測により得られた光強度信号 $m(y)$ をメモリに記憶する。そして、上記と同様の位相検出の手法により、計測用パターン $P M_1$ の $Y$ 位置 $y_1$ を求める。そして、主制

御装置 $2 0$ では、得られた計測用パターン $P M_1$ の座標値 $(x_1, y_1)$ に基づいて、レチクル $R 3$ の光軸中心に対する位置ずれを補正する。

【0151】上記のレチクル $R 3$ の位置ずれの補正が終了すると、主制御装置 $2 0$ では、照明光 $I L$ が計測用パターン $B M_2$ を含む計測用パターン $B M_2$ より一回り大きい矩形領域部分のみに照射されるように可動レチクルブラインド $1 2$ を駆動制御して照明領域を規定する。この状態で、上記と同様に、スリットスキャン方式で計測用パターン $B M_2$ の空間像計測及びその $X Y$ 位置の計測を行い、その結果を内部メモリに記憶する。

【0152】以後、主制御装置 $2 0$ では、上記と同様に、照明領域を変更しつつ、計測用パターン $B M_3 \sim B M_5$ について空間像の計測及び $X Y$ 位置の計測を繰り返し行う。

【0153】これにより得られた計測用パターン $B M_2 \sim B M_5$ の座標値 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 、 $(x_4, y_4)$ 、 $(x_5, y_5)$ に基づいて、所定の演算を行うことにより、投影光学系 $P L$ の倍率及びディストーションの少なくとも一方を算出する。

【0154】ディストーションとは、イメージフィールド内の周辺で本来直線になるべきものが曲った像になる投影光学系 $P L$ の収差であり、このディストーションにより倍率誤差がある場合と同様にパターン像が像面上の所定の位置からずれて（横ずれして）結像される。

【0155】従って、上述した倍率及びディストーションの計測方法によると、投影光学系 $P L$ のイメージフィールド内の異なる位置に投影される各計測用パターンの空間像の位置ずれを、位相検出の手法により、それぞれ精度良く求めることができるので、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。

【0156】但し、単一の $30 \mu m$ 角のパターン像 $B M_n'$ （ $n = 1, 2, \dots, 5$ ）をスリットスキャンしてもその像のエッジは2個所しかなく、計測精度が十分得られない場合もある。このような場合は、コマ収差の影響を受けることが殆ど無い程度の大きな $L/S$ パターン、例えば $5 \mu m$ 以上のライン幅の $L/S$ パターン（この空間像は、ライン幅 $1 \mu m$ の $L/S$ パターン像となる）から成る計測用パターン（便宜上「 $C M_1 \sim C M_5$ 」と呼ぶ）が、計測用パターン $B M_1 \sim B M_5$ に代えて形成されたレチクルを用いれば良い。図 $1 7$ には、このようなレチクルを用いて空間像計測を行う際に、スリット板 $9 0$ 上にその計測用パターン $C M_1 \sim C M_5$ の空間像 $C M_n'$ （ $n = 1, 2, \dots, 5$ ）が形成された状態が示されている。

【0157】なお、上では、位相検出の手法により、計測用パターンの空間像の位置ずれを計測するものとしたが、これに限らず、前述と同様に、スリットスキャン方式の空間像計測を投影光学系 $P L$ のイメージフィールド

内の異なる位置に投影される計測用パターン ( $B M_n$  又は  $C M_n$ ) の空間像 ( $B M_n'$  又は  $C M_n'$ ) について繰り返し行い、その繰り返しにより得られた複数の光強度信号  $m(x)$  (光電変換信号) それぞれと所定のスライスレベルとの交点に基づいて各光電変換信号に対応する空間像 ( $B M_n'$  又は  $C M_n'$ ) の位置 (エッジの位置) をそれぞれ算出し、該算出結果に基づいて投影光学系 PL のディストーション及び倍率の少なくとも一方を求めることがとても良い。かかる場合には、スライス法を用いたエッジ検出の手法により、投影光学系 PL のイメージフィールド内の異なる位置に投影される空間像 ( $B M_n'$  又は  $C M_n'$ ) の位置をそれぞれ精度良く求めることができ、結果的にディストーション及び倍率の少なくとも一方を精度良く計測することができる。この場合、設定されたスライスレベルで各光強度信号が 2 値化され、そのスライスレベルの設定が適切な場合には、例えば図 7 の波形 P2 と P3 との関係から想像できるように、焼き付けにより実際に得られるレジスト像のエッジ位置を計測するのと等価となる。

【0158】ところで、現状の露光装置では、投影光学系のディストーション (倍率を含む) の管理は、基準ウエハを用いて次のようにして行われている。ここで、基準ウエハとは、投影光学系による露光領域内に  $30 \mu m$  角のアウター BOX マークを転写した後、現像工程を経てエッチングを行い、そのエッチング後にアウター BOX マークのエッジの位置を光波干渉式座標測定器などで予め計測しておいたものである。そして、露光装置のディストーション計測時にはエッチングされた  $30 \mu m$  角のアウター BOX マークの中心に、 $10 \mu m$  角のインナー BOX マークのレジスト像を焼き付け、相対位置をレジストレーション測定器などで計測する。

【0159】従って、ウエハ上 (像面上) で  $10 \mu m$  角の BOX マークの空間像をエッジ検出の手法により検出することにより、ディストーション計測を行えば、コマ収差の影響が基準ウエハを用いた上記のディストーション計測時と同等になり、相対的な差が発生しない。このため、上記の基準ウエハを用いたディストーション計測と同等な精度 (accuracy) でディストーションを空間像から計測できるようになる。

【0160】これを実現するために、前述したデバイスレチクルやレチクルフィデューシャルマーク板に  $50 \mu m$  角 (ウエハ上  $10 \mu m$  角) のインナー BOX マークを形成することが考えられる。しかるに、最近の CMP プロセスでは、ウエハ上  $10 \mu m$  角のマークはディッシングが生じるために入れられない。

【0161】そこで、発明者は、鋭意検討した結果、ウエハ上  $10 \mu m$  角の BOX マークの非計測方向 ( $10 \mu m$  である必要はない) をストライプ状に細分化したマーク (以下、適宜「擬似 BOX マーク」と呼ぶ) を用いて、空間像計測を行えば良いとの結論に達した。その理

由は、擬似 BOX マークは、いわゆる L/S パターンの一種であり、その周期方向に垂直な方向に空間像計測器をスキャンして、スリットスキャン方式により空間像計測を行えば、得られる信号波形は、BOX マークの空間像から得られる信号波形と同様の信号波形が得られるからである。

【0162】発明者は、図 15 に示される計測用レチクル R3 の計測用パターン  $B M_1$  ~  $B M_5$  に代えて、計測用パターンを X 方向に関してストライプ状に細分化した擬似ボックスパターンを形成した計測用レチクル R3' を用いて、前述と同様の手順でエッジ検出の手法による投影光学系 PL のディストーション計測を行った結果、各計測用パターンの Y 位置として、計測用パターン  $B M_n$  の Y 位置と同等の値となることが確認された。これより、Y 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンと、X 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンとが形成された計測用レチクルなどを用意し、それぞれの計測用パターンをスリット 22a, 22b で相対走査することにより、ディストーション計測を行うことができる。

【0163】図 18 には、上述した Y 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンと、X 方向に関して細分化された擬似ボックスパターンその他の計測用パターンが形成されたマークブロック ( $300 \mu m$  角) の一例が示されている。この図 18 において、符号 MM1, MM2 は、例えば 5 本の  $5 \mu m$  L/S マークから成る倍率計測パターンであり、符号 MM3, MM4 は、例えば 29 本の  $1 \mu m$  L/S マークから成るフォーカス計測パターンであり、符号 MM5, MM6 は、例えば 11 本の  $2.5 \mu m$  L/S マークから成る擬似ボックスパターンである。この図 18 のマークブロックは、例えばデバイスレチクルやレチクルフィデューシャルマーク板に形成される。なお、擬似ボックスパターンの細分化は、例えば  $2.5 \mu m$  L/S 程度 (ウエハ上  $0.5 \mu m$  L/S 程度) 以下が望ましい。

【0164】次に、投影光学系のコマ収差の計測方法について説明する。コマ収差の計測は、L/S マークを計測用パターンとして用いる第 1 の方法と、Line in Box マークを計測用パターンとして用いる第 2 の方法とが代表的に挙げられる。

【0165】(第 1 の方法) 焼き付け法により、コマ収差を測定する場合に、解像限界付近の小 L/S マーク像の線幅異常値を用いる方法が知られている。ここで、線幅異常値とは、焼き付けによって形成されるレジスト像の非対称の度合いを表す指標となる値である。例えば、図 19 に示される  $0.2 \mu m$  L/S マーク (設計値) のレジスト像を例にとって説明すると、線幅異常値 A は、両端のラインパターンの線幅 L1, L5 を用いて、次の (4) 式のように定義される。

【0166】

【数3】

$$A = \frac{L1 - LS}{L1 + LS} \quad \dots(4)$$

【0167】Aは通常3%未満が投影光学系(投影レンズ)に望まれる性能である。

【0168】空間像計測においてもこのようなL/Sパターン像の線幅異常値を直接計測することが出来る。この場合は、先に説明したスライス法によるエッジ検出の手法を用いれば良いが、スライスレベルの決定に当たって、空間像に対応する光強度信号を適当な閾値(スレッショルドレベル)で2値化し、レジスト像の線幅に近づけるという簡単なレジスト像シミュレーションを行うことにより、その閾値をスライスレベルとして決定することが望ましい。

【0169】以下、この線幅異常値の計測によるコマ収差の計測方法について説明する。このコマ収差の計測には、例えば図20に示されるように、パターン領域PAの中心と4角の部分の合計5箇所に計測用パターンDM<sub>1</sub>～DM<sub>5</sub>が形成された計測用レチクルR4が用いられる。計測用パターンDM<sub>1</sub>～DM<sub>5</sub>としては、ライン幅1μm(ウェハ面上で0.2μm)でデューティ比50%のX軸方向に周期性を有するL/Sパターンが用いられる。また、この場合、空間像計測器59を構成するスリット板90及び空間像計測器59の構成等は、前述した倍率・ディストーション計測の際と同じ構成となっている。

【0170】この場合、主制御装置20では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測用パターンDM<sub>2</sub>～DM<sub>5</sub>の空間像(DM<sub>2</sub>'～DM<sub>5</sub>')に対する光強度信号m(x)を得る。

【0171】そして、この得られた各光強度信号m(x)と所定のスライスレベルとの交点をそれぞれ求め、その求められた交点のX座標から空間像DM<sub>2</sub>'～DM<sub>5</sub>'のそれぞれについて各ラインのライン幅を求め、このライン幅に基づいてそれぞれの線幅異常値を(4)式に基づいて算出し、この算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求める。

【0172】コマ収差は、レンズの種々の輪帶で倍率が異なることによるレンズの収差であり、投影光学系PLのイメージフィールド内の主軸から離れた部分に生じる。従って、光軸から離れた位置では、L/Sパターンの空間像の内、各ラインパターンの線幅はコマ収差に応じて異なることになる。従って、スライス法を用いてエッジ検出の手法により各ラインパターンの線幅異常値を検出する上記方法によると、コマ収差を精度良く、かつ容易に計測することが可能となる。

【0173】なお、各計測用パターンDM<sub>1</sub>～DM<sub>5</sub>が5つのラインパターンを含む単独のL/Sパターンであるため、線幅異常値の計測精度が不十分である場合には、

各計測用パターンとして、5本のL/Sパターンが所定周期で複数組み配置された複合マークパターンを、各計測用パターンとして用いても良い。図21には、このような複合マークパターンが計測用パターン(EMと呼ぶ)として用いられる場合に、スリット板90上に計測用パターンEMの空間像EM'が形成された様子が示されている。

【0174】この空間像EM'は、図22に示されるように、2つの基本的な周波数成分、すなわち光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する0.4μmピッチの周波数成分(第1基本周波数成分)f1と、各L/Sパターンの全体の幅に対応する第2基本周波数成分、すなわち、ここでは、各L/Sパターンの繰り返し周期(5本のマークからなるマークグループの配置ピッチ)である3.6μmピッチに対応する周波数成分f2とを有する。

【0175】従って、前述と同様に、主制御装置20では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測用パターンEM<sub>2</sub>～EM<sub>5</sub>の空間像(EM<sub>2</sub>'～EM<sub>5</sub>')に対する光強度信号m(x)を得た場合に、各光強度信号の第1基本周波数成分と、第2基本周波数成分との位相差を前述した位相検出の手法により算出し、該算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求めるとしても良い。

【0176】空間像計測の対象となるパターンの走査方向の幅が狭いほど、コマ収差の影響を大きく受けるので、L/Sパターンの各ラインパターンの空間像に対するコマ収差の影響と、L/Sパターンの全体を1つのパターンと見た場合のそのパターンの空間像に対するコマ収差の影響とは相違する。従って、光電変換信号の各ラインパターンのピッチに対応する第1基本周波数成分と、L/Sパターンの全体の幅に対応する第2基本周波数成分との位相差を算出し、該算出結果に基づいて投影光学系のコマ収差を求める上記方法によると、位相検出の手法により、投影光学系PLのコマ収差を精度良く求めることができる。なお、この場合マークの配置ピッチ(上の例では0.4μm)と5本のマークからなるマークグループの配置ピッチ(上の例では3.6μm)の比率は整数倍とすることが信号処理上からは望ましい。

【0177】(第2の方法) 次に、コマ収差の第2の測定方法について説明する。この方法では、図23(A)に示されるように、パターン領域PA内の中心及び4角の部分の合計5箇所に計測用パターンFM<sub>1</sub>～FM<sub>5</sub>が形成された計測用レチクルR5が用いられる。計測用パターンFM<sub>n</sub>(n=1, 2, …, 5)としては、図23(B)に拡大して示されるようなLine in Box Markと呼ばれるマークパターンが用いられる。このマークパターンは、図23(B)に示されるように、1辺がD1(例えばD1=150μm)の正方形パターンの内部に、同

心でかつ1辺がD2（例えばD2=100μm）の正方形のスペースパターン（幅D3）が形成されたマークパターンである。この計測用パターンFM<sub>n</sub>をウェハ上に焼き付け、現像すると、30μm角のレジスト残しマークの中心に20μm角の細溝が同時に形成される。細溝は（波長/N. A.）/2以下程度の太さとすることが望ましく、従ってD3は、その5倍以下程度とすることが望ましい。例えば、D3は、0.5μmとされる。

【0178】このマーク計測用パターンFM<sub>n</sub>を、コマ収差のある投影光学系で結像すると細線の方が太線よりも横ずれが大きく発生するため、細溝が偏心して対称性が崩れる。従って、その細溝の偏心量、すなわち対称性の崩れかたの程度を計測することにより、コマ収差の影響を知ることができる。

【0179】また、この場合、空間像計測器59を構成するスリット板90及び空間像計測器59の構成等は、前述した倍率・ディストーション計測の際と同じ構成となっている。

【0180】そこで、主制御装置20では、前述した倍率・ディストーション計測の際と同様の手順で、レチクルアライメント、及び空間像計測を行って、計測用パターンFM<sub>2</sub>～FM<sub>5</sub>の空間像（FM<sub>2</sub>’～FM<sub>5</sub>’とする）に対応する光強度信号m(x)を得る。

【0181】そして、各光強度信号と所定のスライスレベルとの交点に基づいて計測用パターンの空間像FM<sub>2</sub>’～FM<sub>5</sub>’の対称性のずれを算出し、該算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求める。

【0182】このようにスライス法を用いたエッジ検出の手法により、計測用パターンFM<sub>2</sub>～FM<sub>5</sub>の空間像の対称性のずれを算出し、その算出結果に基づいて投影光学系PLのコマ収差を求める上記方法によると、投影光学系PLのコマ収差を精度良く求めることができる。

【0183】上記の場合において、スリット板90上のスリット22a、22bの配置上、非計測方向のスリットが空間像と干渉する場合も考えられる。このような場合、上記計測用マークFM<sub>n</sub>に代えて、例えば線幅50μm程度の太いラインパターンと、例えば線幅0.5～0.75μm程度の細いラインパターンが計測方向に所定間隔（例えば、50μm程度）で並んだ左右対称の1次元マークを計測用パターンとして用いても良い。

【0184】図24には、このような計測用パターン（GM<sub>n</sub>とする）の空間像GM<sub>n</sub>’がスリット板90上に形成された状態が示されている。この図24において、D4は10μm、D5は0.1～0.15μmである。このような空間像GM<sub>n</sub>’に対応する光強度信号を、前述したスライス法によるエッジ検出の方法により検出することにより、投影光学系PLのコマ収差を検出しても良い。

【0185】走査方向（計測方向）の幅が細いラインパターンの空間像ほどコマ収差の影響により大きく位置ず

れする結果、計測用パターン（GM<sub>n</sub>）のように、走査方向に対応する方向に所定間隔で配置された線幅の異なる複数種類のラインパターンを有する対称マークパターンの空間像は、コマ収差が大きいほどその対称性が大きくずれる。

【0186】そのため、上記の空間像GM<sub>n</sub>’の対称性のずれを検出する方法によると、投影光学系PLのコマ収差を精度良く検出することができる。

【0187】勿論、この場合も、計測再現性を向上するため、図25のような繰り返し配置された計測用パターンの空間像HM’を検出することとしても良い。

【0188】次に、照明テレンセンの測定方法について説明する。

【0189】照明テレンセンは像位置がデフォーカスによって変化する量を測定して決定する。計測用パターンとしては、倍率、ディストーション測定と同様にコマ収差の影響を受けない大きなマークパターンが用いられる。焼きけ法による場合は、Box in Box Markあるいは大L/Sマークが用いられ、ベストフォーカス位置、+1μm程度のデフォーカス位置、-1μm程度のデフォーカス位置の3点で、それぞれ露光を行い、像位置とフォーカス位置の関係を計測し、照明テレンセン（=（像の横ずれ量/デフォーカス量））を計算することが行われる。

【0190】空間像計測の場合は、焼き付けと同様にコマ収差の影響を受けない大きなマークを用い、空間像の絶対位置を各フォーカス位置で計測し、照明テレンセンを計算する。

【0191】以上詳細に説明したように、本第1の実施形態の露光装置100によると、スリット幅2D=n・(λ/N. A.)、n≤0.8であるスリット板90を有する空間像計測器59を備えていることから、この空間像計測器を用いてレチクルあるいはレチクルフィデューシャルマーク板上の計測用パターンの空間像計測を行うことにより、空間像→空間像強度信号の変換の際に像プロファイルの劣化の少ない高精度な空間像計測が可能となる。この場合、光センサ24（光電変換素子）以降の信号処理系には大きなダイナミック・レンジが不要となる。

【0192】また、露光装置100では、主制御装置20が、空間像計測器59を用いて前述のスリットスキャン方式による空間像の計測、及びこの計測結果を用いての前述したような投影光学系PLの種々の結像特性の計測を、高精度に行うことができる。そのため、この結像特性の計測結果に基づいて、例えば工場内における露光装置の立ち上げ時等に投影光学系PLの光学性能の調整を高精度に行うことができる。あるいは、特にディストーションや倍率等については、定期的に上記の計測を行い、この計測結果に基づいて投影光学系PLの不図示の結像特性補正装置（例えば、投影光学系を構成する特定のレンズエレメントをZ・チルト駆動する装置、あるい

は投影光学系を構成する特定のレンズ間に設けられた気密室の内圧を調整する装置など)を用いて、ディストーションや倍率(特に走査露光時の非走査方向)等を補正することができる。なお、走査露光時の走査方向の倍率の補正は、例えば、走査露光時のレチクルとウエハの少なくとも一方の走査速度を調整することにより行われる。

【0193】このように、露光装置100では、例えば投影光学系の結像特性の初期調整、あるいは、露光開始に先立って投影光学系の結像特性の調整により、高精度に結像特性が調整された投影光学系PLを用いて、露光が行われるので、結果的に露光精度の向上が可能となる。

【0194】また、露光装置100では、主制御装置20により、空間像計測器59を用いて、マーク検出系としてのアライメント顕微鏡ALG1のベースライン量の検出が精度良く行われるので、そのベースライン量を用いて、露光時等にウエハWの位置を制御することにより、レチクルとウエハとの重ね合せ精度の向上が可能であり、この点においても露光精度の向上が可能となっている。

【0195】なお、上記実施形態では、スリット幅2Dが、照明光の波長λと投影光学系PLの開口数N.A.との両者を考慮して決定されている場合について説明したが、本発明がこれに限定されるものではない。

【0196】すなわち、スリット幅2Dを、波長λ、開口数N.A.のいずれか一方のみを考慮して定めても良い。このようなスリット幅2Dのスリットを有するスリット板を備えた空間像計測器を用いても、上記実施形態と同様に、スリットスキャン方式により、所定パターンの空間像(像強度の分布)の精度の高い計測が可能である。

【0197】次に、スリット幅(2D)の決定に関して更に説明する。ここでは、一例として、フォーカス計測の場合を取り上げて好適なスリット幅の決定方法に関して説明する。

$$N \propto S^{1/2} \cdot D O F \propto \lambda \cdot S^{1/2} / (N.A.)^2 \quad \dots (5)$$

の関係がある。ここで、N.A.は、投影光学系の開口数である。

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S^{1/2} / \lambda \propto \lambda \cdot S^{1/2} / P \quad \dots (6)$$

の関係が成り立つ。ここで、S/Nは、一次成分の振幅とノイズ振幅との比であるS/N比である。

【0204】(2) ダーク・ノイズが支配的な場合

ダーク・ノイズは1次成分の振幅Sに依存しない。1次

$$N \propto D O F \propto \lambda / (N.A.)^2$$

の関係がある。

$$S/N \propto (N.A.)^2 \cdot S / \lambda \propto \lambda \cdot S / P \quad \dots (7)$$

の関係がある。

【0206】(6)、(8)式よりスリット幅(2D)を最適にする際には、波長と対象パターン・ピッチが決

【0198】前述の如く、投影光学系のベストフォーカス位置の計測は、スリット板90のZ軸方向(光軸方向)の位置を変化させつつ、計測用パターンの空間像計測をスリットスキャン方式により複数回繰り返し、これにより得られた光強度信号の(1次/0次)の振幅比であるコントラストが最大となるスリット板90のZ位置(コントラストピークのZ座標)を検出することにより求める。

【0199】通常、ベストフォーカスの検出に際しては、スリット板90を、0.15μmのピッチ間隔で、15段階(ステップ)程度変化させる。

【0200】ここで、図26を用いて上記のベストフォーカス検出の一例について説明する。この図26は、スリット板90を13段階(ステップ)でZ軸方向に変化させ、各点で得られた13点のコントラストの計測値(図26中の×印)を横軸をZ軸として示すものである。図26中に×印で示される13点のコントラストの計測値に基づいて、4次程度の近似曲線Cを最小二乗法によって求める。この近似曲線Cと、適当な閾値(スレッショルドレベル)SLとの交点を求め、交点間の距離=2Bの中点をベストフォーカスに対応するZ座標値とする。

【0201】図27には、図26と同様の線図が示されている。但し、この図27では縦軸は、1次成分の振幅(又は後述するファースト・オーダー)を示す。ここで、図27におけるWZ(=ステップピッチ×データ数)の範囲を固定にした時のフォーカス検出精度を考える。

【0202】(1) ショットノイズが支配的な場合  
1次成分の振幅をSとすると、ショットノイズはS<sup>1/2</sup>に比例する。1次周波数成分(以下、適宜「1次成分」と略述する)の振幅のZに関する曲線の平均傾きは焦点深度(DOF)に反比例するので、各1次成分の振幅のノイズがデータのZ方向へ及ぼす揺らぎをノイズNとすれば、

【0203】かかるに、対象パターンの線幅をPとすると、P ∝ λ / N.A.の関係があるので、

成分の振幅のZに関する曲線の平均傾きはDOFに反比例するので、各1次成分の振幅のノイズがデータのZ方向へ及ぼす揺らぎをノイズNとすれば、

$$\dots (7)$$

【0205】従って、対象パターンの線幅をPとして、

$$\dots (8)$$

定していれば、1次成分の振幅Sのみに着目すれば良く、S/N比は、ノイズの性質によって1次振幅Sの0.5~1乗に比例することがわかる。

【0207】図28(A)～図31(B)には、スリット幅(2D)の好ましい範囲を求めるためのシミュレーション結果の一例が示されている。このうち、図28(A)、図29(A)、図30(A)及び図31(A)は、N. A. = 0.68、 $\lambda = 248\text{ nm}$ 、 $\sigma = 0.85$ の条件の場合を示す。また、図28(B)、図29(B)、図30(B)及び図31(B)は、N. A. = 0.85、 $\lambda = 193\text{ nm}$ 、 $\sigma = 0.85$ の条件の場合を示す。

【0208】図28(A)、(B)は、フォトマルチブライヤを用いた例を想定して(6)式を適用した場合のフォーカス検出に関するS/N比を示す。図28(A)において、実線(●)、破線(■)、点線(▲)は、計測用パターンとして、ライン幅しがそれぞれ200nm、220nm、250nmで、デューティ比がいずれも50%のL/Sパターンを用いた場合を、それぞれ示す。図28(B)において、実線(●)、破線(■)、点線(▲)は、計測用パターンとして、ライン幅しがそれぞれ120nm、130nm、140nmで、デューティ比がいずれも50%のL/Sパターンを用いた場合を、それぞれ示す。

【0209】図29(A)、(B)は、図28(A)、(B)にそれぞれ対応するコントラストを示す。コントラストは、スリット幅が小さいほど大きくなる。0次の振幅はスリット幅に比例するので、コントラストに0.

$$m(x) = \int_{x-D}^{x+D} i(t) dt \quad \dots(9)$$

【0216】フォーカス検出は解像限界のL/Sの強度像の0次、1次の比(コントラスト)より計算する。空間像の強度像に含まれる0次成分の強度をa、1次成分の強度をb  $\cdot \sin(\omega_1 \cdot x)$  とすれば、観測されるスリット透過強度 $m_0(x)$ 、 $m_1(x)$ は次の(10)、(11)式のようになる。但し、 $\omega_1$ は、解像限界の空間周波数である。

【0217】

【数5】

$$m_0(x) = a \int_{x-D}^{x+D} dt = 2aD \quad \dots(10)$$

$$\omega_1 D = \pi / 2 \cdot (2n - 1)$$

(但し、n = 1, 2, 3, ...)

【0221】(12)式を満足するとき、 $D = \pi / (2\omega_1)$ の奇数倍のときに、1次成分のゲインが最大となる(コントラストが最大となる)ので、スリット幅2Dが $\pi / \omega_1$ の奇数倍となるとき、すなわち最小マークピッチの半分(以下、適宜「最小ハーフピッチ」と呼ぶ)の奇数倍であることが望ましい。

【0222】また、1次成分のゲインが高く、0次成分のゲインが低いほど電気系のダイナミックレンジは楽になるので、結局、(12)式でn=1の場合、すなわち

3μmを基準としたスリット幅の比率を乗じたものがファースト・オーダー(1st Order)である。これは1次成分の振幅に比例する。

【0210】図30(A)、(B)には、図28(A)、(B)にそれぞれ対応するファースト・オーダーが、示されている。

【0211】図28(A)、(B)から、結果的にいずれの波長、線幅の場合でも、フォーカス検出に最適なスリット幅(2D)は、パターンピッチ(=2L)の半分と同じ長さが最適であることが判明した。ピッチに関しては小さい程良いが、勿論解像限界以内であることが必須である。従って、スリット幅の最適値は露光装置の解像限界ピッチの半分程度となる。

【0212】図31(A)、(B)は、図28(A)、(B)と同一条件で、(8)式を適用した場合のフォーカス検出に関するS/N比を示す。

【0213】ここで、スリット幅2Dの最適化について、更に別の観点から説明する。

【0214】空間像計測器のスリットの幅2D、空間像の強度分布をi(x)とするとスリット透過強度m(x)は、前述した(1)式を一般化した次の(9)式で表される。

【0215】

【数4】

【0218】

【数6】

$$m_1(x) = b \int_{x-D}^{x+D} \sin(\omega_1 t) dt = \frac{2b}{\omega_1} \sin(\omega_1 x) \cdot \sin(\omega_1 D) \quad \dots(11)$$

【0219】(10)式より、0次成分はスリット幅に単純に比例し、(11)式より1次成分は、次の(12)式の条件を満足するときに最大になる。

【0220】

$$\dots(12)$$

スリット幅2Dが $\pi / \omega_1$ の場合、換言すれば最小ハーフピッチと一致する場合が最良である。

【0223】図32(A)、(B)には、スリット幅2Dが最小ハーフピッチの1倍のとき、3倍のときの、シミュレーションデータが、それぞれ示されている。これらの図において、実線の曲線LL1はスリット透過光の強度信号を示し、一点鎖線LL2はその微分信号を示し、破線LL3は空間像強度を示す。これらの図において、横軸はスリット位置であり、縦軸は信号強度である。

【0224】図33(A)、(B)には、スリット幅2Dが最小ハーフピッチの5倍のとき、7倍のとき、シミュレーションデータが、それぞれ示されている。これらの図において、実線の曲線LL1はスリット透過光の強度信号を示し、一点鎖線LL2はその微分信号を示し、破線LL3は空間像強度を示す。これらの図において、横軸はスリット位置であり、縦軸は信号強度である。

【0225】図32(A)、(B)及び図33(A)、(B)において微分信号LL1の振幅は、同一振幅となっていることがわかる。但し、スリット幅2D=最小ハ

ーフピッチ×nのnが1、3、5、7と大きくなるに従って、信号処理系(光センサ以降の処理系)により大きなダイナミックレンジが必要となることがわかる。これより、スリット幅2Dが最小ハーフピッチに一致する場合が最良であることがわかる。

【0226】また、前述した(1)、(2)式をフーリエ変換すると、スリットによる平均化効果の周波数特性が判明する。

【0227】

【数7】

$$p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot \exp(-2\pi ux) dx = 2D \frac{\sin(2\pi uD)}{2\pi uD} = 2D \frac{\sin(\omega D)}{\omega D} \quad \dots(13)$$

【0228】図34には、解像限界の空間周波数を $\omega_1$ として、スリット幅2Dが解像限界のハーフピッチの1、3、5倍の時の周波数特性が示されている。この図34において、符号G F 5、G F 3、G F 1は、それぞれ、スリット幅が最小ハーフピッチの5倍、3倍、1倍の場合の周波数特性線図を示す。この図34から明らかなように、ゲイン(利得)の安定性の面でも、スリット幅が最小ハーフピッチに一致する場合(G F 1)が、最良であることがわかる。

【0229】《第2の実施形態》次に、本発明の第2の実施形態について図35及び図36に基づいて説明する。ここで、前述した第1の実施形態に係る露光装置100と同一若しくは同等の構成部分については、同一の符号を用いるとともに、その説明を簡略化し若しくは省略するものとする。

【0230】図35には、この第2の実施形態に係る露光装置の構成が一部省略されて示されている。この露光装置110は、マーク検出系としてのアライメント光学系ALG2の構成のみが、露光装置100と相違する。そこで、以下においては、この相違点を中心として説明する。

【0231】このアライメント光学系ALG2は、図35に示されるように、投影光学系PLの側面に設けられたオフアクシス方式のレーザ・スキャン式アライメントセンサである。

【0232】このアライメント光学系ALG2は、図35に示されるように、アライメント用光源132、ハーフミラー134、第1対物レンズ136、第2対物レンズ138、シリコンフォトダイオード(SPD)140等を含んで構成されている。ここで、光源132としては、ヘリウム・ネオンレーザが用いられる。このアライメント顕微鏡ALG2では、図35に示されるように、光源132からレーザビームが、ハーフミラー134、第1対物レンズ136を介してウエハW上のアライメントマークMwを照明するためのレーザビームスポットを

形成する。レーザビームは通常固定されており、ウエハステージWSTを走査(スキャン)することによってレーザビームとアライメントマークMwとを相対走査する。

【0233】アライメントマークMwから発生する散乱光は第1対物レンズ136、ハーフミラー134、及び第2対物レンズ138を介してシリコン・フォトダイオードSPD140上に集光されて受光される。顕微鏡ALG2には、0次光フィルタが挿入されており暗視野になっており、アライメントマークMwの存在する位置だけで散乱光が検出される。そして、SPD140が受光した光の光電変換信号がSPD140から主制御装置20に供給される。主制御装置20では、この光電変換信号と、そのときのウエハ干渉計31の出力であるウエハステージWSTの位置情報とに基づいて、干渉計光軸で規定されるステージ座標系におけるアライメントマークMwの座標位置を算出するようになっている。

【0234】このようなステージスキャン・タイプのレーザ・スキャン式アライメントセンサのベースラインの安定性は、レーザのビーム位置の安定性と干渉計の安定性、及びSPD～電気系のゲインの安定性によって決定する。

【0235】ここで、このアライメント顕微鏡ALG2のベースラインの計測について説明する。前提として、レチクルRがレチクルステージRST上に搭載されているものとする。

【0236】まず、主制御装置20では、前述と同様にして、レチクルR上に形成されたレチクルアライメントマークPMの投影像を、空間像計測器59を用いて計測し、レチクルパターン像の投影位置を求める。すなわち、レチクルアライメントを行う。

【0237】次に、主制御装置20では、ウエハステージWSTを移動して、図36に示されるように、レーザビームスポットに対して空間像計測器59のスリット22を走査し、レーザ光の透過光の強度信号と同時にウエ

ハ干渉計31の計測値を取り込み、レーザビームプロファイルを得、それに基づいてビームスポットの位置を求める。これにより、レチクルRのパターン像の投影位置とアライメント光学系ALG2のレーザスポット照射位置との相対位置、すなわちアライメント顕微鏡ALG2のベースライン量を求める。

【0238】以上説明した本第2の実施形態に係る露光装置110によると、前述した第1の実施形態の露光装置100と、同等の効果を得ることができる。また、この場合も、主制御装置20により空間像計測器59を用いて、アライメント顕微鏡ALG2のベースライン量が検出されるが、このベースライン量の検出に当たり、レチクルパターン像の投影位置及びアライメント顕微鏡ALG2の位置を、空間像計測器59により直接的に計測することができるので、精度の高いベースライン量の計測が可能である。

【0239】なお、空間像計測器59のスリット板90上のスリットの配置は、前述したものに限らず、例えば図37(A)に示されるように、前述したスリット22a、22bの組みに加え、X軸に対して45°、135°を成す方向にそれぞれ伸びるスリット22c、22dの組みを加えても良い。勿論、これらのスリット22c、22dの長手方向に垂直な方向のスリット幅2Dは、スリット22a、22bと同様の基準により同様の寸法に定められる。

【0240】この場合、図37(A)に示されるように、矢印C方向に空間像計測器59(ウェハステージWST)を走査しつつ、例えば図37(A)に示される空間像PM'に対してスリット22dを走査することにより、その空間像に対応する光強度信号を精度良く検出することができる。また、図37(B)に示されるように、矢印D方向に空間像計測器59(ウェハステージWST)を走査しつつ、例えば図37(B)に示される空間像PM'に対してスリット22cを走査することにより、その空間像に対応する光強度信号を精度良く検出することができる。

【0241】なお、上記の2組のスリット(22a、22b)、(22c、22d)をスリット板90上に設ける場合、それら各組のスリットがある程度離して配置されるため、ウェハステージWST内部の受光光学系及び光センサの構成として、各組のスリットを光学的あるいは電気的な選択機構によって選択できる構成を採用しても良い。具体的には、シャッタで光路が切り替え可能な受光光学系と単一の光電変換素子とを組み合わせても良いし、受光光学系及び光電変換素子を各組のスリットに対してそれぞれ設けても良い。

【0242】次に、像回復について説明する。

【0243】前述した(1)、(2)式より、スリットスキャンによる平均化は、空間周波数的にはp(x)のフーリエ変換によりどのようなスペクトルかが判明す

る。これは一般に装置関数P(u)と呼ばれている。装置関数は前述した(13)式で示される。

【0244】(13)式の周波数特性の逆特性のフィルタP\_inv(u)は次の(14)式で示され、これを観測される空間像の強度信号m(x)のフーリエスペクトルに乗じてから逆フーリエ変換を行えば像回復が行われる。

$$P_{\text{inv}}(u) = 1/P(u) \quad \dots (14)$$

インコヒーレント結像の光学的伝達関数(OTF)の上限が2N.A./λであるから完全な像回復のためには次の(15)式を満たす必要がある。

【0245】

【数8】

$$D < \frac{\lambda}{4N.A.} \quad \dots (15)$$

【0246】以上のような像回復の手法を用いれば、非常に細い孤立線の像プロファイルも回復できる。孤立線は様々な周波数成分を含んでおり、孤立線の空間像を複数のフォーカスで計測し、これらを用いてレンズの波面収差を計測することも考えられる。

【0247】また、繰り返しパターンであるL/Sマークを像回復することで、レンズの離散的な周波数成分の波面収差を測定することも考えられる。

【0248】これらの波面収差の測定に際しての空間像計測には、例えば図37(A)に示される4方向についての空間像の計測が可能な空間像計測器59を用いることが望ましい。

【0249】なお、上記各実施形態では、本発明がステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、マスクと基板とを静止した状態でマスクのパターンを基板に転写するとともに、基板を順次ステップ移動させるステップ・アンド・リピート型の露光装置にも本発明は適用することができる。

【0250】また、上記各実施形態では、本発明が半導体製造用の露光装置に適用された場合について説明したが、これに限らず、例えば、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを転写する液晶用の露光装置や、薄膜磁気ヘッドを製造するための露光装置などにも本発明は広く適用できる。

【0251】また、上記各実施形態では、露光用照明光としてKrFエキシマレーザ光(248nm)、ArFエキシマレーザ光(193nm)などを用いる場合について説明したが、これに限らず、g線(436nm)、i線(365nm)、F2レーザ光(157nm)、銅蒸気レーザ、YAGレーザの高調波等を露光用照明光として用いることができる。

【0252】また、上記各実施形態では、投影光学系として縮小系を用いる場合について説明したが、これに限

らず、投影光学系として等倍あるいは拡大系を用いても良い。

【0253】また、ウェハステージやレチクルステージにリニアモータ（米国特許第5, 623, 853号又は米国特許第5, 528, 118号の公報参照）を用いる場合は、エアペアリングを用いたエア浮上型およびローレンツ力又はリアクタンス力を用いた磁気浮上型のどちらを用いても良い。

【0254】また、ステージは、ガイドに沿って移動するタイプでも良いし、ガイドを設けないガイドレスタイプでも良い。

【0255】ウェハステージの移動により発生する反力は、特開平8-166475号公報（米国特許第5, 528, 118号）に記載されているように、フレーム部材を用いて機械的に床（大地）に逃がしても良い。

【0256】レチクルステージの移動により発生する反力は、特開平8-330224号公報（米国特許出願シリアルナンバー416558号）に記載されているように、フレーム部材を用いて機械的に床（大地）に逃がしても良い。

【0257】複数のレンズから構成される照明光学系、投影光学系を露光装置本体に組み込み光学調整をするとともに、多数の機械部品からなるレチクルステージやウェハステージを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、更に総合調整（電気調整、動作確認等）をすることにより本実施形態の露光装置を製造することができる。なお、露光装置の製造は温度およびクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

【0258】半導体デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、この設計ステップに基づいたレチクルを製作するステップ、シリコン材料からウェハを作成するステップ、前述した実施形態の露光装置によりレチクルのパターンをウェハに転写するステップ、デバイス組み立てステップ（ダイシング工程、ポンディング工程、パッケージ工程を含む）、検査ステップ等を経て製造される。

### 【0259】

【発明の効果】以上説明したように、本発明に係る空間像計測方法及び空間像計測装置によれば、十分な精度で空間像を計測することができるという効果がある。

【0260】また、本発明に係る結像特性計測方法によれば、投影光学系の結像特性を精度良く計測することができるという従来にない優れた効果がある。

【0261】また、本発明に係る露光装置によれば、露光精度の向上を図ることができるという効果がある。

### 【図面の簡単な説明】

【図1】第1の実施形態に係る露光装置100の概略的な構成を示す図である。

【図2】図1のアライメント顕微鏡及び空間像計測器の内部構成を示す図である。

【図3】光センサをウェハステージの外部に配置した空間像計測器の変形例を示す図である。

【図4】アライメント顕微鏡によりウェハ上のアライメントマークを検出している様子を示す図である。

【図5】アライメント顕微鏡のベースラインの計測に際して、アライメント顕微鏡により空間像計測器のスリットを検出している状態を示す図である。

【図6】図6（A）は、空間像の計測に際してスリット板上に空間像PM'が形成された状態の空間像計測器を示す平面図、図6（B）はその空間像計測の際に得られる光電変換信号（光強度信号）Pの一例を示す線図である。

【図7】ライン幅0.2μm、デューティ比50%のL/Sマークの空間像を計測した場合に対応する結像シミュレーションの結果を示す線図であって、ベストフォーカス位置でのシミュレーション結果を示す線図である。

【図8】図7の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す線図である。

【図9】ベストフォーカス位置から0.2μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す線図である。

【図10】図9の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す線図である。

【図11】ベストフォーカス位置から0.3μmデフォーカスした場合のシミュレーション結果を示す線図である。

【図12】図11の強度信号P3をフーリエ変換した際の空間周波数成分を、元の強度信号P3とともに示す線図である。

【図13】像面形状の検出に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図14】球面収差の検出に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図15】倍率及びディストーション測定に際して用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図16】倍率及びディストーション測定に際して用いられる空間像計測器59を示す平面図である。

【図17】大きなL/Sパターンから成る計測用パターンが形成されたレチクルを用いて空間像計測を行う際に、スリット板上にその計測用パターンの空間像CMn'が形成された状態の空間像計測器を示す平面図である。

【図18】擬似ボックスパターンその他の計測用パターンが形成されたマークブロックの一例を示す図である。

【図19】コマ収差の第1の計測方法を説明するための図であって、レジスト像の一例を示す図である。

【図20】コマ収差の第1の計測方法に用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図である。

【図21】5本のL/Sパターンが所定周期で複数組み配置された複合マークパターンを、各計測用パターンとして用いた場合にその空間像EM'がスリット板上に形成されたときの空間像計測器を示す平面図である。

【図22】図21に示される空間像EM'が、2つの基本的な周波数成分を有することを説明するための図である。

【図23】図23(A)はコマ収差の第2の計測方法に用いられる計測用レチクルの一例を示す平面図、図23(B)は図23(A)の各計測用パターンを拡大して示す図である。

【図24】線幅の太いラインパターンと線幅の細いラインパターンが計測方向に所定間隔で並んだ左右対称の1次元マークから成る計測用パターンの空間像GM'がスリット板上に形成されたときの空間像計測器を示す平面図である。

【図25】図24の場合の1次元マークが繰り返し配置された計測用パターンの空間像HM'がスリット板上に形成されたときの空間像計測器を示す平面図である。

【図26】スリット板を13段階(ステップ)でZ軸方向に変化させ、各点で得られた13点のコントラストの計測値(×印)を横軸をZ軸として示す図である。

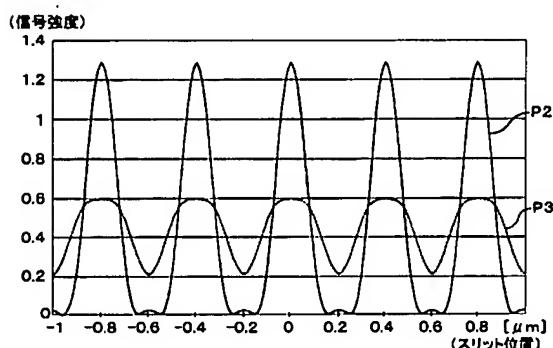
【図27】スリット板を13段階(ステップ)でZ軸方向に変化させ、各点で得られた13点の1次成分の振幅の値(×印)を横軸をZ軸として示す図である。

【図28】図28(A)、(B)は、それぞれ所定条件の下で、フォトマルチプライヤを用いた例を想定して(6)式を適用した場合の、フォーカス検出に関するS/N比を示すグラフである。

【図29】図29(A)、(B)は、図28(A)、(B)にそれぞれ対応するコントラストを示すグラフである。

【図30】図30(A)、(B)は、図28(A)、(B)にそれぞれ対応するファースト・オーダーを示すグラフである。

【図7】



【図31】図31(A)、(B)は、図28(A)、(B)と同一条件で、(8)式を適用した場合のフォーカス検出に関するS/N比を示すグラフである。

【図32】図32(A)、(B)は、スリット幅が最小ハーフピッチの1倍のとき、3倍のときの、スリット透過光の強度信号、その微分信号及び空間像強度のシミュレーションデータを、それぞれ示す図である。

【図33】図33(A)、(B)は、スリット幅が最小ハーフピッチの5倍のとき、7倍のときの、スリット透過光の強度信号、その微分信号及び空間像強度のシミュレーションデータを、それぞれ示す図である。

【図34】スリット幅が解像限界のハーフピッチの1、3、5倍の時の周波数特性を示す図である。

【図35】第2の実施形態に係る露光装置の構成を一部省略して示す図である。

【図36】第2の実施形態の露光装置において、アライメント顕微鏡ALG2のベースライン計測に際して、レーザビームスポットの位置を空間像計測器を用いて計測しているときの状態を示す図である。

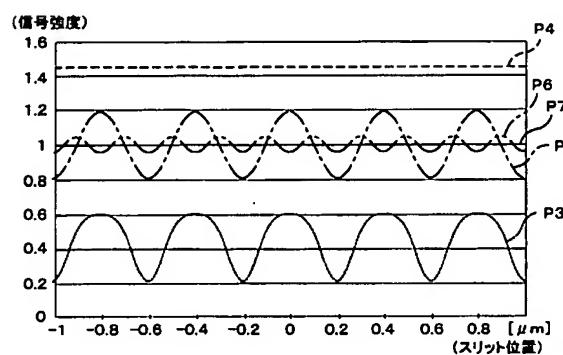
【図37】空間像計測器のスリット板上のスリットの他の配置例、及びそのようなスリットが形成された空間像計測器の使用方法を説明するための図である(図37(A)、(B))。

【図38】従来の空間像計測方法について説明するための図である(図38(A)～(C))。

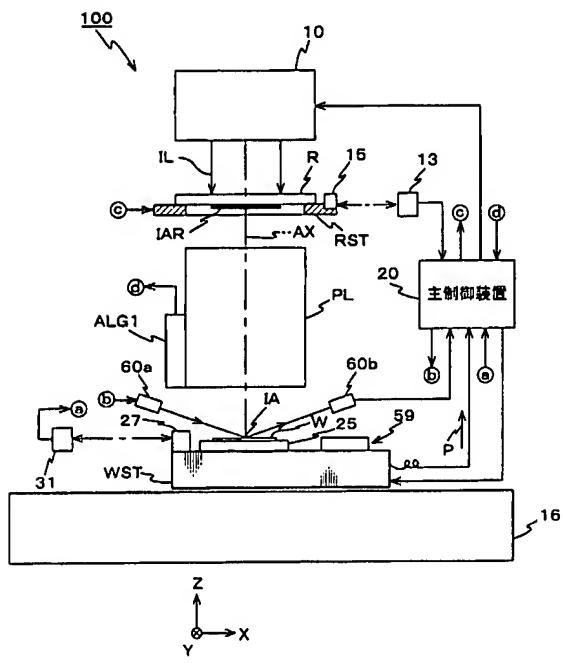
#### 【符号の説明】

10…照明系(照明装置、空間像計測装置の一部)、20…主制御装置(制御装置、処理装置、空間像計測装置の一部)、22a～22d…スリット(空間像計測装置の一部)、24…光センサ(光電変換素子、空間像計測装置の一部)、90…スリット板(空間像計測装置の一部)、100…露光装置、PL…投影光学系、IL…照明光、R…レチクル(マスク)、W…ウエハ(基板)、WST…ウエハステージ(基板ステージ)、ALG1、ALG2…アライメント顕微鏡(マーク検出系)。

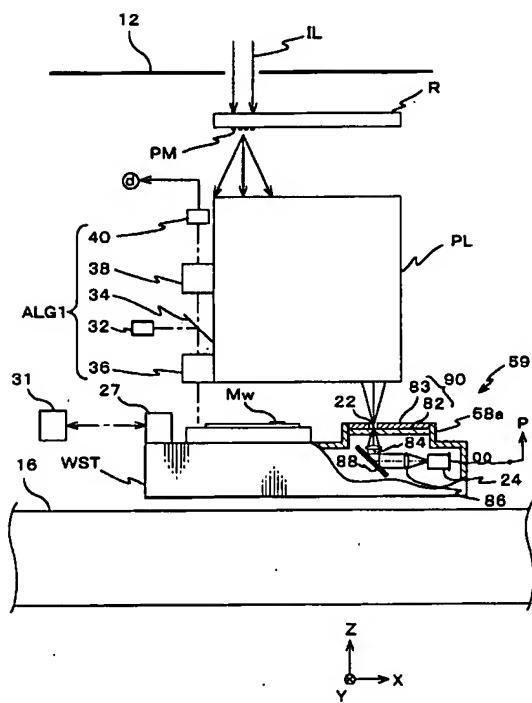
【図8】



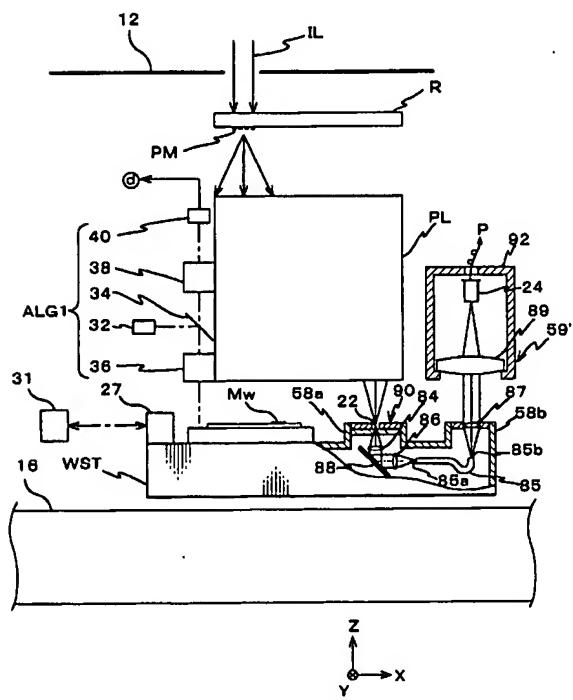
【図1】



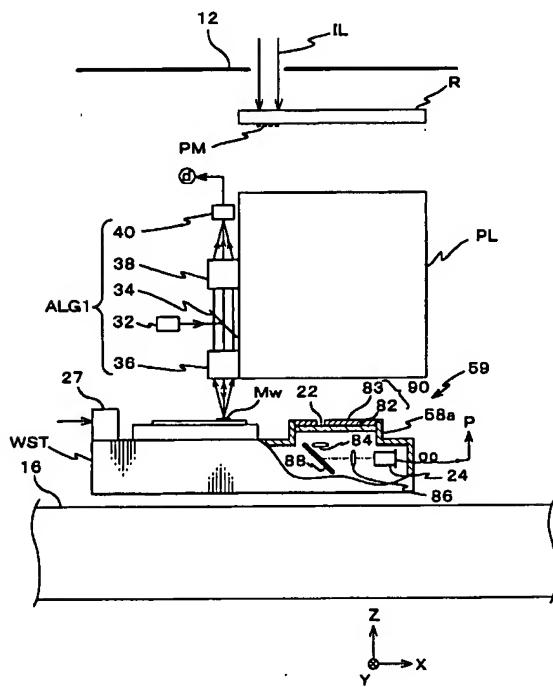
【図2】



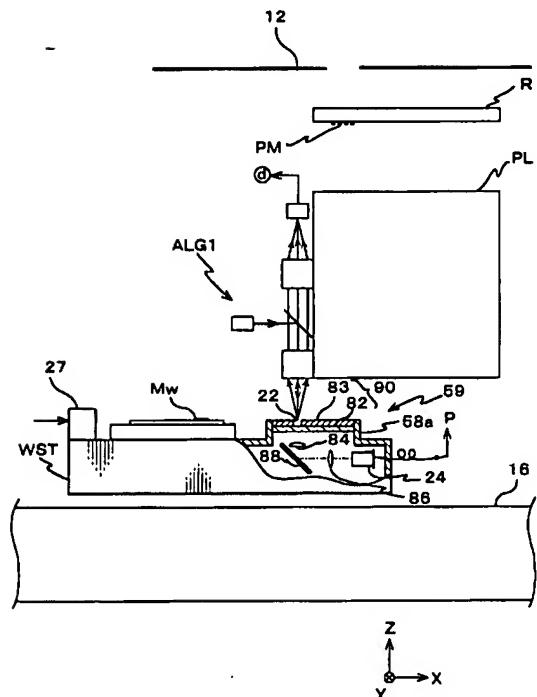
【図3】



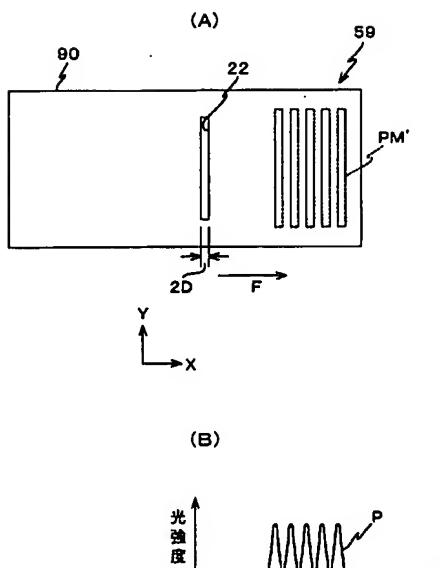
【図4】



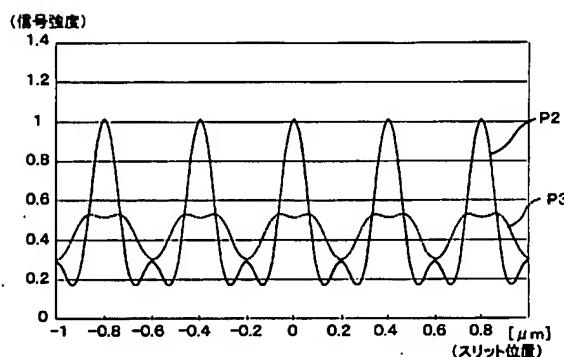
【図5】



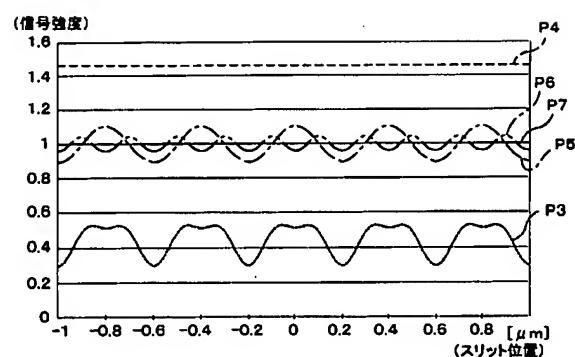
【図6】



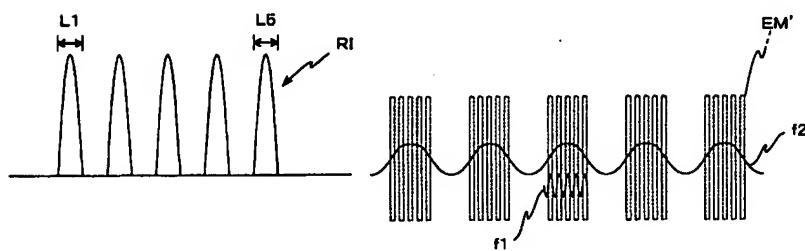
【図9】



【図10】

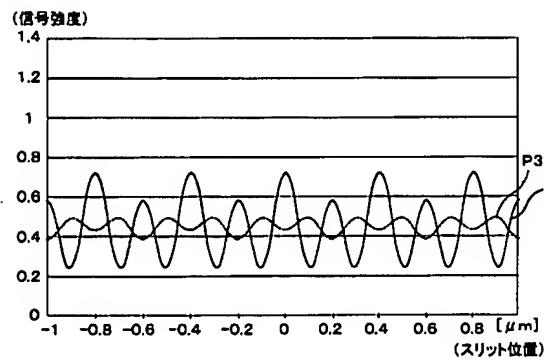


【図19】

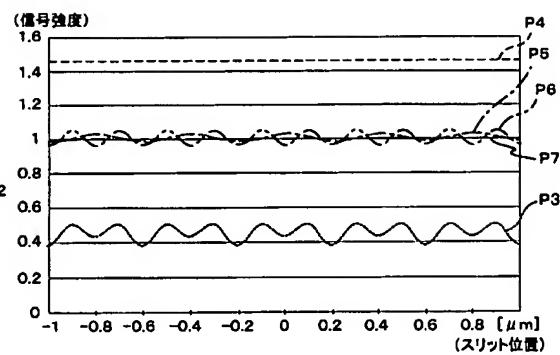


【図22】

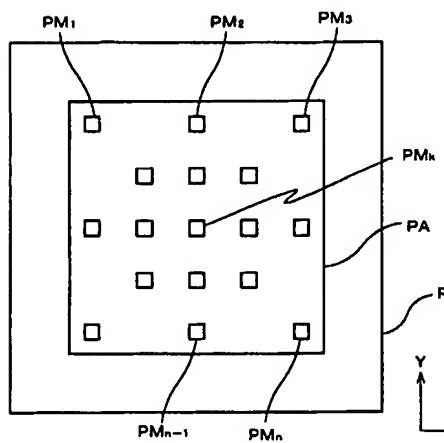
【図11】



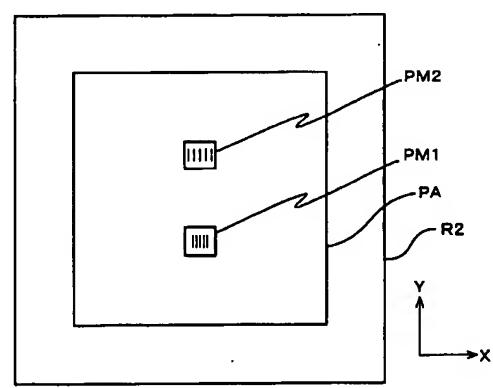
【図12】



【図13】

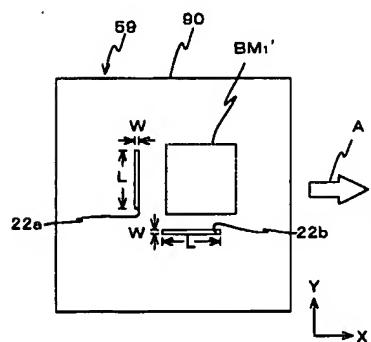


【図14】

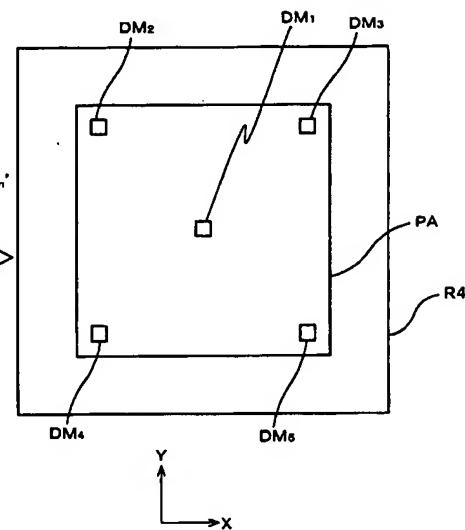
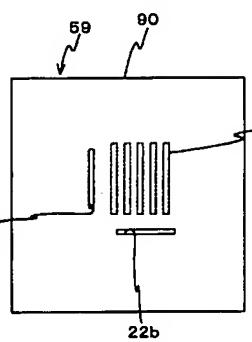


【図20】

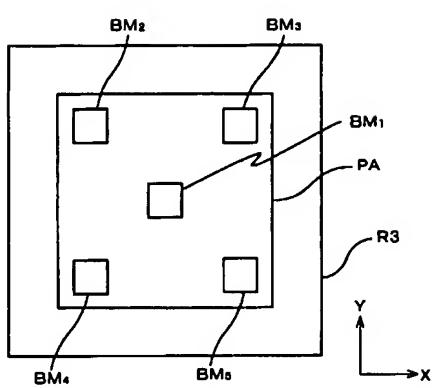
【図16】



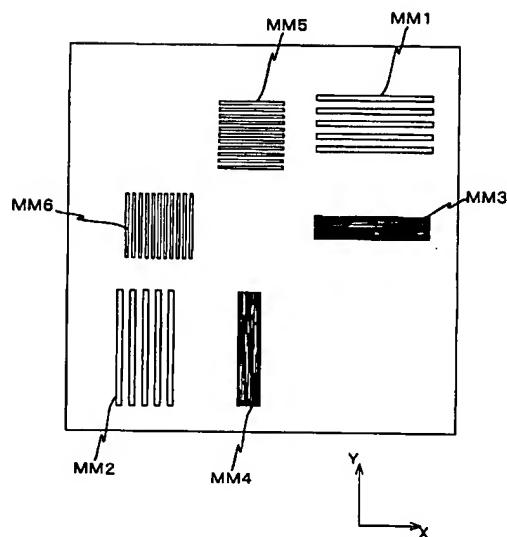
【図17】



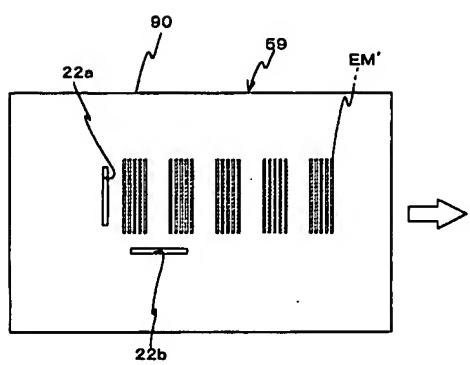
【図15】



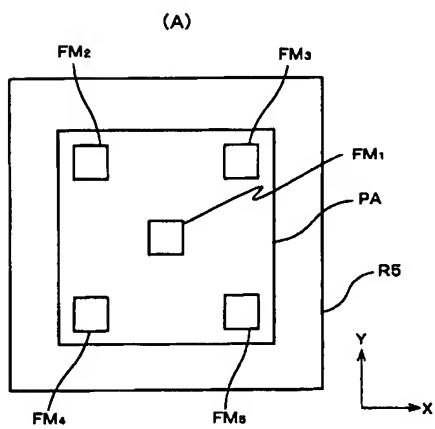
【図18】



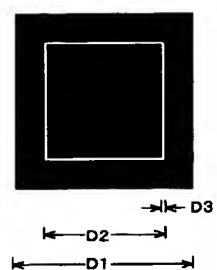
【図21】



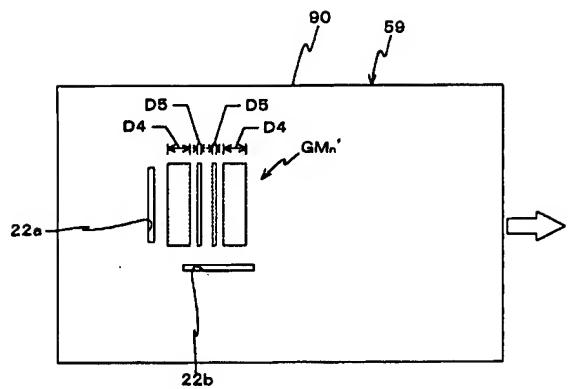
【図23】



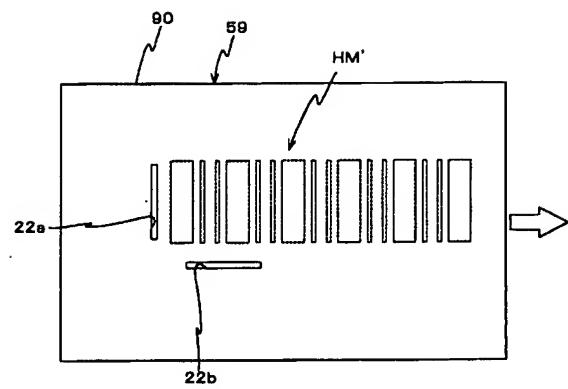
(B)



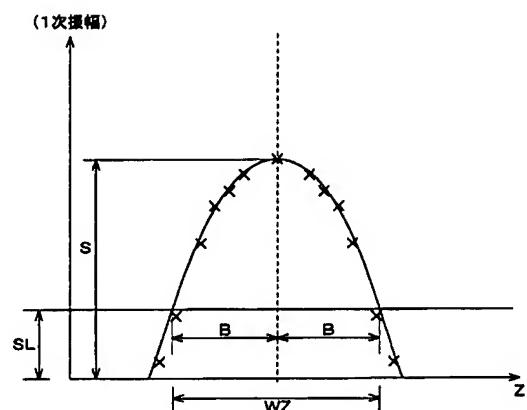
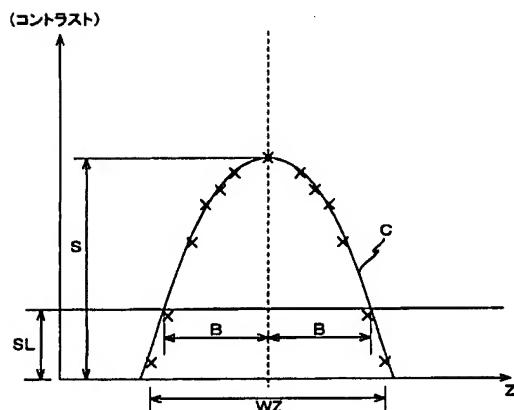
【図24】



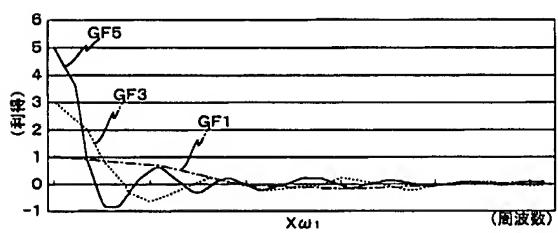
【図25】



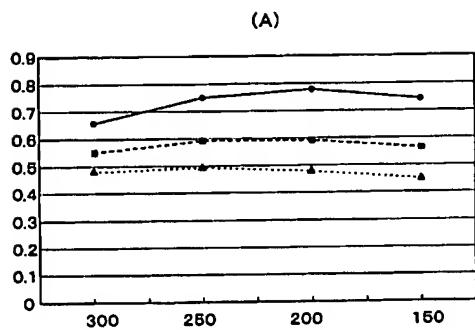
【図26】



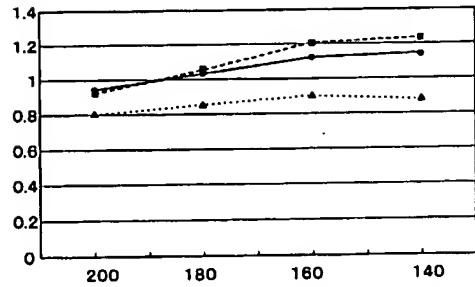
【図34】



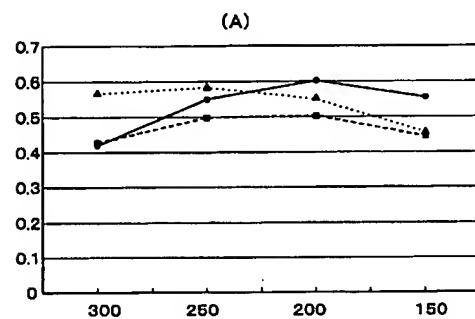
【図28】



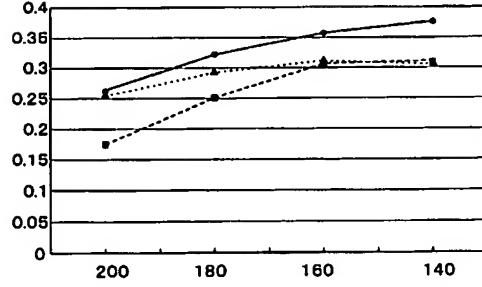
(B)



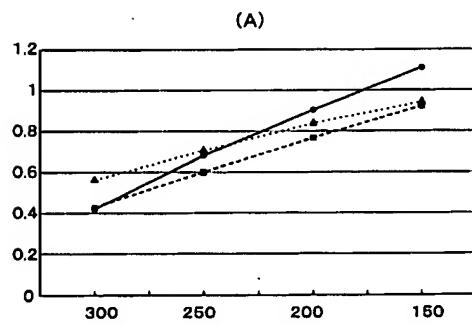
【図29】



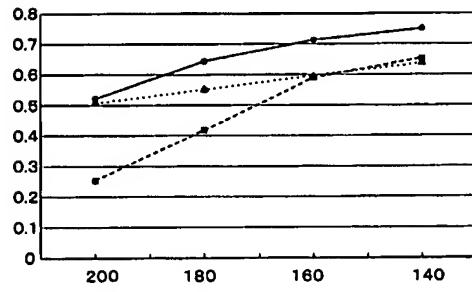
(B)



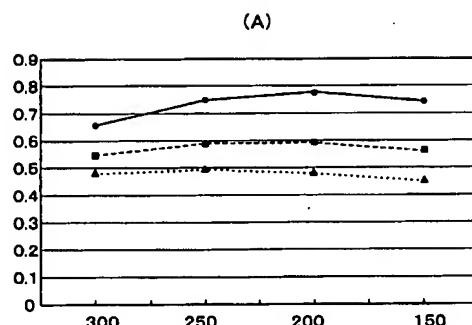
【図30】



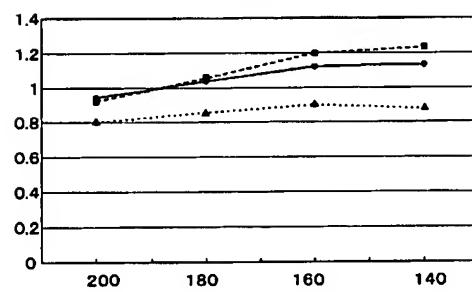
(B)



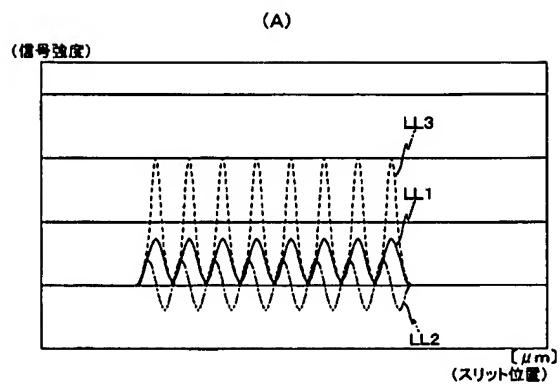
【図31】



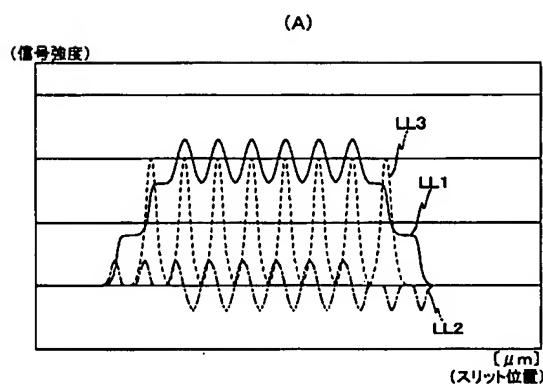
(B)



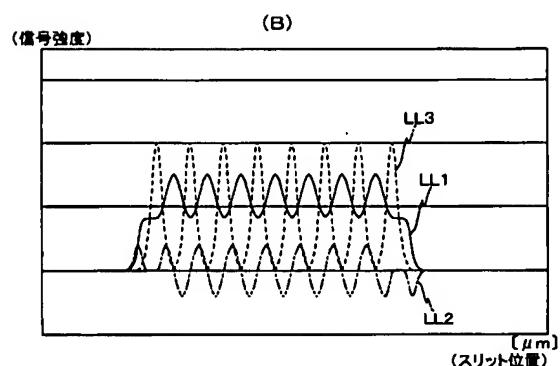
【図32】



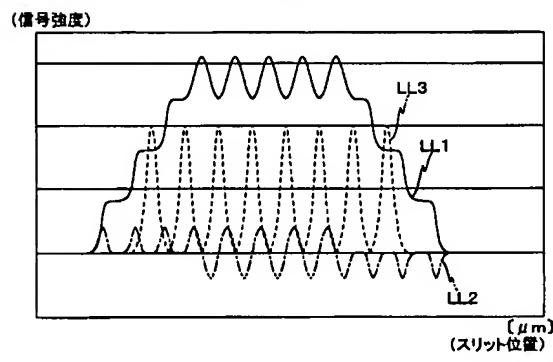
【図33】



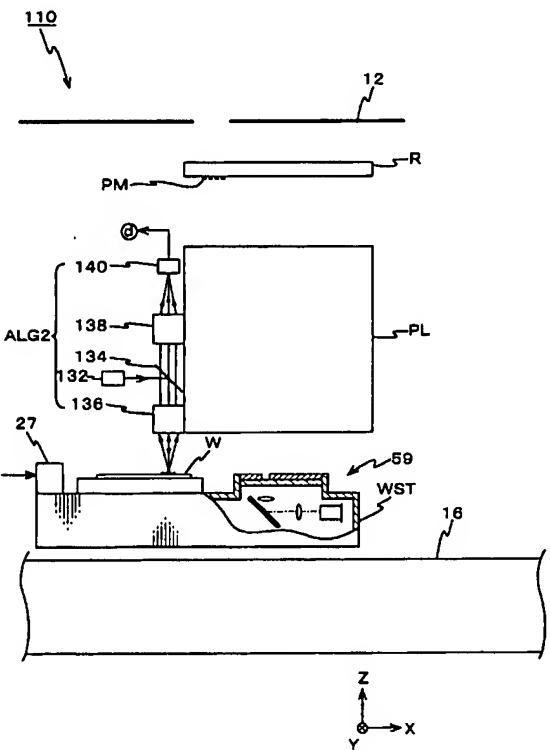
(B)



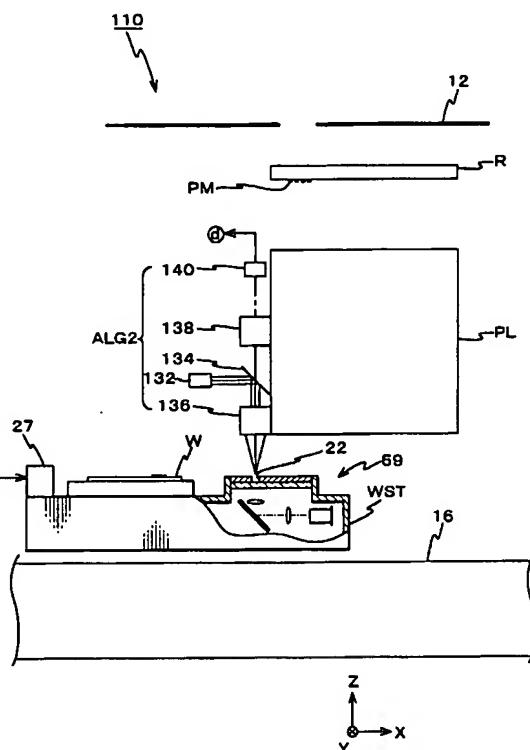
(B)



【図35】

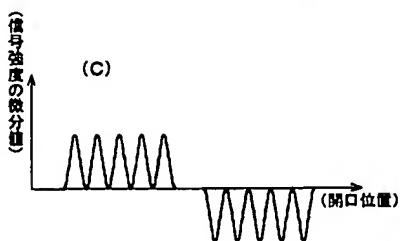
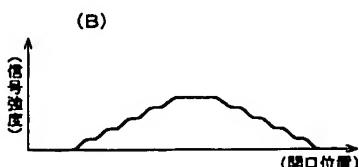
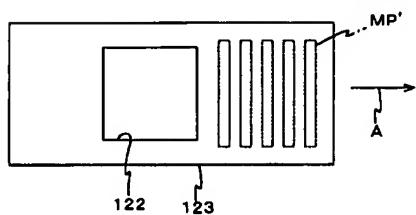


【図36】

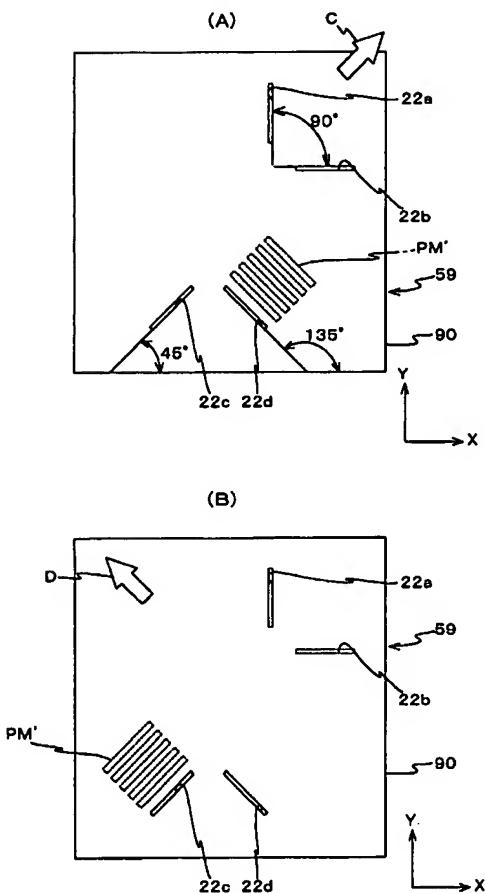


【図38】

(A)



【図37】



フロントページの続き

(51) Int.C1.7

G 0 3 F 7/22

H 0 1 L 21/027

識別記号

F I

G 0 3 F 7/22

H 0 1 L 21/30

マーク (参考)

H

5 2 5 R

F ターム (参考) 2F065 AA04 AA06 AA07 CC20 DD04  
 EE08 FF01 GG04 HH06 HH13  
 LL01 LL28 LL63 MM24 PP12  
 QQ16 QQ23 QQ41 UU01 UU02  
 UU05  
 2G086 HH05 HH07  
 5F046 BA03 DB05 DB08 FA09 FA16  
 FB14 FB16